

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

# **Studie budících obvodů magnetické smyčkové antény**

## **Study of MLA Coupling Circuits**

# Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Radek Fajkus**

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2612T059 Mobilní technologie

Téma:

Studie budících obvodů elektricky malé smyčkové antény  
Study of MLA Coupling Circuits

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Práce se zabývá analýzou jednotlivých způsobů napájení malé smyčkové antény. Analýza bude provedena v programu CST Studio Microwave. Student má za úkol popsat jednotlivé budící obvody antény zhodnotit jejich přednosti.

Vypracovaná práce bude splňovat následující body zadání:

1. Stručný popis antény MLA. Obsáhlejší analýza budících obvodů.
2. Vytvoření modelu antény MLA v programu CST-MW s různými typy budících obvodů.
3. Vytvoření simulací blízkého a vzdáleného pole MLA, PSV a S11.
4. Provést kontrolní měření na reálném vzorku antény.
5. Podrobná analýza výsledků simulací a měření pro různé typy budících obvodů.

Seznam doporučené odborné literatury:

[1] Oldřich Burger, Marek Dvorský. *Magnetická smyčková anténa: pokaždé trochu jinak*, 1. vyd. Ostrava: EDUCA TV, 2015. ISBN 978-80-260-7485-4.


[2] Příručka CST Studio Microwave.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

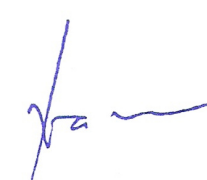
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Dvorský, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 20.3.2018

.....  
podpis studenta

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava.

V Ostravě 22. dubna 2018

.....*Fajkus*.....

Rád bych poděkoval Ing. Marku Dvorskému, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá analýzou různých způsobů napájení malé smyčkové antény. Práce v teoretické části popisuje MLA anténu a různé budící obvody. V praktické části se práce věnuje vytvoření simulačního modelu s jednotlivými typy budících obvodů a jejich podrobnou analýzou jak z hlediska blízkého pole, tak i vzdáleného pole.

**Klíčová slova:** budící obvody, magnetická smyčková anténa, blízké pole, vzdálené pole

## **Abstract**

This thesis analyzes the different ways to power a small loop antenna. In the theoretical part, thesis describes MLA antenna and various coupling circuits. In the practical part, thesis is dedicated to creating of simulation model with different types of coupling circuits and their detailed analysis in terms of both the near field and far field.

**Key Words:** coupling circuits, far field, magnetic loop antenna, near field

# Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
Seznam obrázků	10
Seznam obrázků	13
Seznam tabulek	14
Úvod	15
<b>1 Magnetická smyčková anténa</b>	<b>16</b>
1.1 Popis magnetické smyčkové antény . . . . .	16
1.2 Vazební obvody magnetické smyčkové antény . . . . .	17
1.2.1 Buzení pomocí indukční vazby . . . . .	17
1.2.2 Buzení pomocí kapacitní vazby - kapacitní dělič . . . . .	20
1.2.3 Buzení pomocí toroidního transformátoru . . . . .	20
1.2.4 Buzení pomocí <i>GAMA</i> pahýlu . . . . .	21
<b>2 Softwarová analýza budících obvodů</b>	<b>24</b>
2.1 Návrh magnetické smyčkové antény . . . . .	24
2.2 Modelování a ladění vybraných budících obvodů . . . . .	26
2.2.1 Analýza indukční vazby . . . . .	26
2.2.2 Analýza kapacitní vazby . . . . .	30
2.2.3 Analýza vazby s <i>GAMA</i> pahýlem . . . . .	31
2.2.4 Analýza vazby s toroidním transformátorem . . . . .	36
2.2.5 Analýza a simulace vlivu polarizace magnetické smyčkové antény . . . . .	39
<b>3 Detailní rozbor výsledků simulací budících obvodů</b>	<b>41</b>
3.1 Porovnání budících obvodů z hlediska impedančního přizpůsobení . . . . .	41
3.2 Analýza zisku a směrovosti budících obvodů . . . . .	46
3.3 Porovnání budících obvodů z hlediska blízkého pole . . . . .	49
3.4 Ověření správnosti modelů s reálnými magnetickými smyčkovými anténami . . .	52
3.5 Zhodnocení dosažených výsledků . . . . .	55
<b>4 Závěr</b>	<b>57</b>
<b>Literatura</b>	<b>58</b>
<b>Přílohy</b>	<b>58</b>

<b>A</b>	<b>Obsah elektronické přílohy</b>	<b>I</b>
<b>B</b>	<b>Magnetická smyčková anténa</b>	<b>II</b>



## Seznam použitých zkratk a symbolů

<b>Symbol</b>	<b>– Popis</b>
dB	– decibel
C	– Kapacita; [F]
d	– průměr; [mm]
L	– indukčnost; [H]
l	– délka; [m]
m	– jednotka délky
Hz	– jednotka frekvence
MLA	– Magnetic Loop Antenna(Magnetická smyčková anténa)
o	– obvod hlavní smyčky
PSV	– Poměr stojatých vln
S11	– Činitel odrazu; [dB]
V	– jednotka napětí
vf	– Vysokofrekvenční
<b>Řecký symbol</b>	<b>– Popis</b>
$\lambda$	– Vlnová délka; [m]

## Seznam obrázků

1.1	Příklady MLA . . . . .	16
1.2	Znázornění komponent MLA(vlevo), ekvivalentní elektrické schéma zapojení(vpravo)[7] - upraveno . . . . .	17
1.3	Příklady budících obvodů magnetické smyčkové antény[1] . . . . .	18
1.4	Druhy nestíněných indukčních vazeb[10] . . . . .	18
1.5	Příklady stíněné indukční vazby[10] . . . . .	19
1.6	Příklady kapacitní vazby[10] . . . . .	20
1.7	Příklady buzení toroidním transformátorem[10] . . . . .	21
1.8	Příklady buzení toroidním transformátorem N:M[10] . . . . .	21
1.9	Příklad buzení pomocí <i>GAMA</i> pahýlu[10] . . . . .	22
1.10	Příklad buzení pomocí <i>Hairpin</i> pahýlu[10] . . . . .	22
1.11	Příklad buzení pomocí Twisted <i>GAMA</i> pahýlu[10] . . . . .	23
1.12	Příklad buzení pomocí <i>T</i> pahýlu[10] . . . . .	23
2.1	Způsob připojení soustředěného portu . . . . .	25
2.2	Model MLA bez použitého budícího obvodu . . . . .	25
2.3	Model MLA s vazební smyčkou . . . . .	26
2.4	Graf závislosti rezonanční frekvence na vzdálenosti vazební smyčky od hlavní smyčky . . . . .	27
2.5	Graf závislosti hodnoty S11 při rezonančním kmitočtu 14 MHz na vzdálenosti vazební smyčky od hlavní smyčky . . . . .	27
2.6	Graf závislosti rezonanční frekvence na průměru vazební smyčky . . . . .	28
2.7	Graf závislosti hodnoty S11 při rezonanční frekvenci 14 MHz na průměru vazební smyčky . . . . .	29
2.8	Příklad zapojení v CST Studiu . . . . .	30
2.9	Graf frekvenční závislosti hodnoty S11 pro vybrané zapojení kapacitní vazby . .	31
2.10	Ukázka MLA s <i>GAMA</i> pahýlem . . . . .	31
2.11	Detail <i>GAMA</i> pahýlu . . . . .	32
2.12	Detail <i>GAMA</i> pahýlu - příčné provedení . . . . .	32
2.13	Graf závislosti rezonanční frekvence na délce pahýlu . . . . .	33
2.14	Graf závislosti minimálních hodnot S11 na délce pahýlu . . . . .	33
2.15	Graf závislosti rezonanční frekvence na vzdálenosti mezi připojením středním vo- dičem a stíněním . . . . .	34
2.16	Graf závislosti S11 na vzdálenosti mezi připojením středním vodičem a stíněním	34
2.17	Graf závislosti rezonanční frekvence na průměru vodiče . . . . .	35
2.18	Graf závislosti minimálních hodnot S11 na průměru vodiče . . . . .	35
2.19	Ukázka MLA toroidním transformátorem . . . . .	36
2.20	Detail toroidního transformátoru . . . . .	37

2.21	Graf závislosti rezonanční frekvence na počtu závitů . . . . .	37
2.22	Graf závislosti S11 na počtu závitů . . . . .	38
2.23	Graf frekvenční závislosti S11 pro vybrané budící obvody- vertikální polarizace .	39
3.1	Smithův diagram průběhu impedance pro MLA s kapacitní vazbou - I. . . . .	42
3.2	Smithův diagram průběhu impedance pro MLA s kapacitní vazbou - II. . . . .	42
3.3	Smithův diagram průběhu impedance pro MLA s kapacitní vazbou - III. . . . .	43
3.4	Smithův diagram průběhu impedance pro MLA s indukční vazbou nestíněnou(ve výšce 2 metry nad zemí) . . . . .	44
3.5	Smithův diagram průběhu impedance pro MLA s indukční vazbou stíněnou(ve výšce 2 metry nad zemí) . . . . .	44
3.6	Smithův diagram průběhu impedance pro MLA s kapacitní vazbou(ve výšce 2 metry nad zemí) . . . . .	45
3.7	Smithův diagram průběhu impedance pro MLA s toroidním transformátorem(ve výšce 2 metry nad zemí) . . . . .	45
3.8	Smithův diagram průběhu impedance pro MLA s <i>GAMA</i> pahýlem(ve výšce 2 metry nad zemí) . . . . .	46
3.9	Směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí pro nestíněnou indukční vazbu - vlevo horizontální pohled, vpravo vertikální pohled . . . . .	46
3.10	Směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí pro stíněnou indukční vazbu - vlevo horizontální pohled, vpravo vertikální pohled . . . . .	47
3.11	Směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí pro kapacitní vazbu - vlevo horizontální pohled, vpravo vertikální pohled . . . . .	47
3.12	Směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí pro MLA s toroidem - vlevo horizontální pohled, vpravo vertikální pohled . . . . .	48
3.13	Směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí pro <i>GAMA</i> pahýl - vlevo horizontální pohled, vpravo vertikální pohled . . . . .	48
3.14	Graf vzdáleného pole elektrické složky - vlevo horizontální pohled, vpravo verti- kální pohled . . . . .	49
3.15	Graf vzdáleného pole magnetické složky - vlevo horizontální pohled, vpravo ver- tikální pohled . . . . .	49
3.16	Blízké pole pro MLA s nestíněnou indukční vazbou . . . . .	50
3.17	Blízké pole pro MLA s stíněnou indukční vazbou . . . . .	50
3.18	Blízké pole pro MLA s kapacitní vazbou . . . . .	51
3.19	Blízké pole pro MLA s <i>GAMA</i> pahýlem . . . . .	51
3.20	Blízké pole pro MLA s toroidním transformátorem . . . . .	51
3.21	MLA s <i>GAMA</i> pahýlem s rezonanční frekvencí 21 MHz . . . . .	52
3.22	Graf frekvenční závislosti S11 pro MLA s <i>GAMA</i> pahýlem - srovnání . . . . .	53
3.23	MLA s indukční vazbou s rezonanční frekvencí 145 MHz . . . . .	53
3.24	Graf frekvenční závislosti S11 pro MLA s indukční vazbou - srovnání . . . . .	54

3.25	MLA-M naladěná na rezonanční frekvenci 14 MHz . . . . .	54
3.26	Graf frekvenční závilosti S11 pro MLA s kapacitní vazbou - srovnání . . . . .	55
B.1	Indukční vazba nestíněná - směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí . .	II
B.2	Indukční vazba stíněná - směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí . . .	III
B.3	Kapacitní vazba - směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí . . . . .	IV
B.4	<i>GAMA</i> pahýl - směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí . . . . .	V
B.5	Toroidní transformátor - směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí . . .	VI
B.6	Indukční vazba nestíněná - E-field . . . . .	VII
B.7	Indukční vazba nestíněná - H-field . . . . .	VIII
B.8	Indukční vazba stíněná - E-field . . . . .	IX
B.9	Indukční vazba stíněná - H-field . . . . .	X
B.10	Kapacitní vazba - E-field . . . . .	XI
B.11	Kapacitní vazba - H-field . . . . .	XII
B.12	<i>GAMA</i> pahýl - E-field . . . . .	XIII
B.13	<i>GAMA</i> pahýl - H-field . . . . .	XIV
B.14	Toroidní transformátor - E-field . . . . .	XV
B.15	Toroidní transformátor - H-field . . . . .	XVI

## Seznam obrázků

## Seznam tabulek

2.1	Použité parametry v CST Studiu . . . . .	24
2.2	Hodnoty rezonanční frekvence a S11 pro grafy 2.4 a 2.5 . . . . .	28
2.3	Hodnoty rezonanční frekvence a S11 pro grafy 2.6 a 2.7 . . . . .	29
2.4	Hodnoty rezonanční frekvence a S11 pro grafy 2.13 a 2.14 . . . . .	33
2.5	Hodnoty rezonanční frekvence a S11 pro grafy 2.15 a 2.16 . . . . .	34
2.6	Hodnoty rezonanční frekvence a S11 pro grafy 2.17 a 2.18 . . . . .	35
2.7	Hodnoty rezonanční frekvence pro graf 2.21 při stejné hodnotě ladícího kondenzátoru	38
2.8	Minimální hodnoty S11 pro graf 2.22 . . . . .	38
2.9	Srovnání minimálních hodnot S11 jednotlivých budících obvodů pro horizontální polarizaci . . . . .	40
3.1	Hodnoty S11 a vyzařovací účinnosti pro různé budící obvody . . . . .	41
3.2	Hodnoty elektrické a magnetické složky blízkého pole pro typy budících obvodů ve vzdálenosti 1 metru . . . . .	50
3.3	Hodnoty elektrické a magnetické složky ze sondy pro různé budící obvody . . . .	52

---

## Úvod

Anténa je jedním z důležitých komunikačních prvků, jejíž úlohou je přeměnit přivedenou vysokofrekvenční energii z vysílače na elektromagnetické pole, které se následně ve formě elektromagnetického vlnění vyzáří do okolního prostoru. Antény přitom mohou nabývat mnoha tvarů a jsou různě velké v závislosti na vlnové délce, pro kterou je anténa určena. Jedním z těchto typů je magnetická smyčková anténa.

Magnetická smyčková anténa, v angličtině také zvaná Magnetic Loop Antenna (MLA), je typem drátových antén, jenž se řadí do skupiny elektricky malých smyčkových antén.

Nazývají se "magnetické", protože u nich na rozdíl od standardních antén (např. dipolová anténa, Yagi-Uda...) převládá magnetická složka elektromagnetického pole.

Magnetické antény jsou rozměrově velmi malé. Lze je využít v oblastech s omezeným prostorem nebo tam, kde je požadována mobilita.

Antény mají malou šířku pásma na své rezonanční frekvenci v rozsahu krátkých vln. Mezi výhody magnetické smyčkové antény patří malý rozměr vzhledem k vlnové délce a není ovlivněna elektrickou interferencí.

Magnetická smyčková anténa může být napájena různými budícími obvody. Každý typ napájení se odlišně impedančně přizpůsobuje. Cílem práce je zmapování možností ladění a srovnání vlivu budících obvodů na magnetickou smyčkovou anténu.

Tato diplomová práce v první kapitole popisuje magnetickou smyčkovou anténu, podrobněji rozebírá jednotlivé budící obvody (vazební obvody) antény z hlediska teorie, které se u dané antény využívají.

V druhé kapitole se práce věnuje návrhu modelu magnetické smyčkové antény a různých vazebních obvodů, včetně vymodelování, a možnostem ladění jednotlivých prvků u budících obvodů v programu CST Studio.

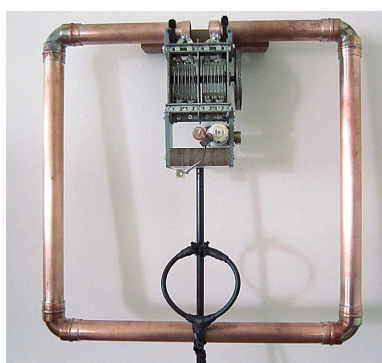
Třetí kapitola je zasvěcena simulacím blízkého a vzdáleného pole MLA, frekvenční závislosti zisku, PSV (poměr stojatých vln) a koeficientu odrazivosti  $S_{11}$  a jejich podrobné analýze, přičemž kapitola srovnává jednotlivé budící obvody. V poslední části této kapitoly se pak práce zabývá srovnáním modelů simulací s reálnými modely antén a s jejich vyhodnocením.

### 1 Magnetická smyčková anténa

Tato kapitola se zabývá krátkým popisem magnetické smyčkové antény. Dále rozebírá jednotlivé budící obvody jak z hlediska jejich provedení, tak i jejich funkce.

#### 1.1 Popis magnetické smyčkové antény

Smyčkové antény se dělí na elektricky velké a elektricky malé. Magnetická smyčková anténa se také nazývá jako elektricky malá smyčková anténa, a to z toho důvodu, že obvod hlavní smyčky je mnohonásobně menší než je vlnová délka, pro kterou je taková anténa vyrobena. Hlavní smyčka antény přitom může nabývat různých tvarů jako je například kruh, čtverec, různé tvary mnohoúhelníků a podobně[1]. Také se můžeme setkat s různými variacemi jako je například fraktálová smyčková anténa, viz. obrázek 1.1c.



(a) Čtvercová[2]



(b) Kruhová[3]



(c) Fraktálová[4]

Obrázek 1.1: Příklady MLA

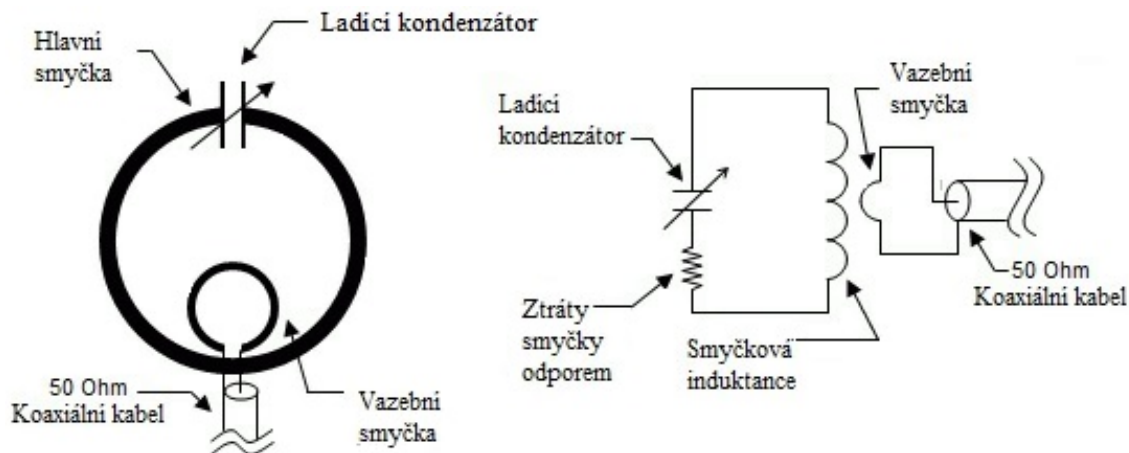
MLA funguje podobně jako vzduchová cívka, jíž protéká vf(vysokofrekvenční) proud. To znamená, že při průchodu proudu anténou se vytváří blízké magnetické pole dle *Ampérova zákona*. U MLA antény tedy převládá převážně magnetická složka pole při porovnání s dipólovou anténou, kde převládá spíše elektrická složka pole[5]. Vzhledem k tomu, že smyčka je mnohonásobně menší než vlnová délka, smyčkou prochází téměř konstantní proud[6].

Magnetické smyčkové antény mohou být velmi malé a lze je použít v místech s omezeným prostorem či tam, kde je vyžadována mobilita. Také vyzařování antény je vždy stejné bez ohledu na vzdálenost od země. MLA má malou šířku pásma. Pokud by byla požadována větší šířka pásma, musela by být například obětována její velikost[7][8].

V podstatě se magnetická smyčková anténa skládá ze tří hlavních částí. Jedná se o již dříve zmiňovanou hlavní smyčku, dále se jedná o vazební obvod a ladící kondenzátor[5][9]. Na obrázku 1.2 vidíme na levé části jednotlivé komponenty. V pravé části pak vidíme náhradní schéma antény. Již nyní si můžeme povšimnout, že se MLA podobá LC obvodu. V podstatě je indukční část prezentována hlavní smyčkou(může mít i více závitů), kondenzátorem pak část kapacitní. Ztráty



## 1. MAGNETICKÁ SMYČKOVÁ ANTÉNA



Obrázek 1.2: Znázornění komponent MLA(vlevo), ekvivalentní elektrické schéma zapojení(vpravo)[7] - upraveno

na hlavní smyčce MLA jsou způsobeny skinefektom. Vazební smyčka pak zajišťuje předávání energie z/do LC obvodu magnetické smyčkové antény[1].

Délka **hlavní smyčky** MLA je odvozena z vlnové délky, přičemž nabývá hodnot  $0,1 - 0,3\lambda$ . Pokud má smyčka MLA více závitů, potom může být samotná anténa mnohem menší. Smyčka je tvořena vodičem, který společně s kondenzátorem tvoří LC obvod.

**Ladící kondenzátor** představuje kapacitní složku MLA. Může být použit pevný kondenzátor, není-li požadavkem přeladitelnost antény. Dále umožňuje měnit pracovní kmitočet MLA. To, jak moc je možné anténu přeladit, ovlivňuje i délka smyčky antény. U vysílací antény je také nutné si dávat pozor na použité dielektrikum, neboť kondenzátor představuje vysokou impedanci na koncích obou smyček, kde vzniká vysoké napětí[1][9].

### 1.2 Vazební obvody magnetické smyčkové antény

Vazební obvod může být zajištěn několika různými způsoby. V této podkapitole si některé z nich představíme. Základní varianty jsou zobrazeny na obrázku 1.3.

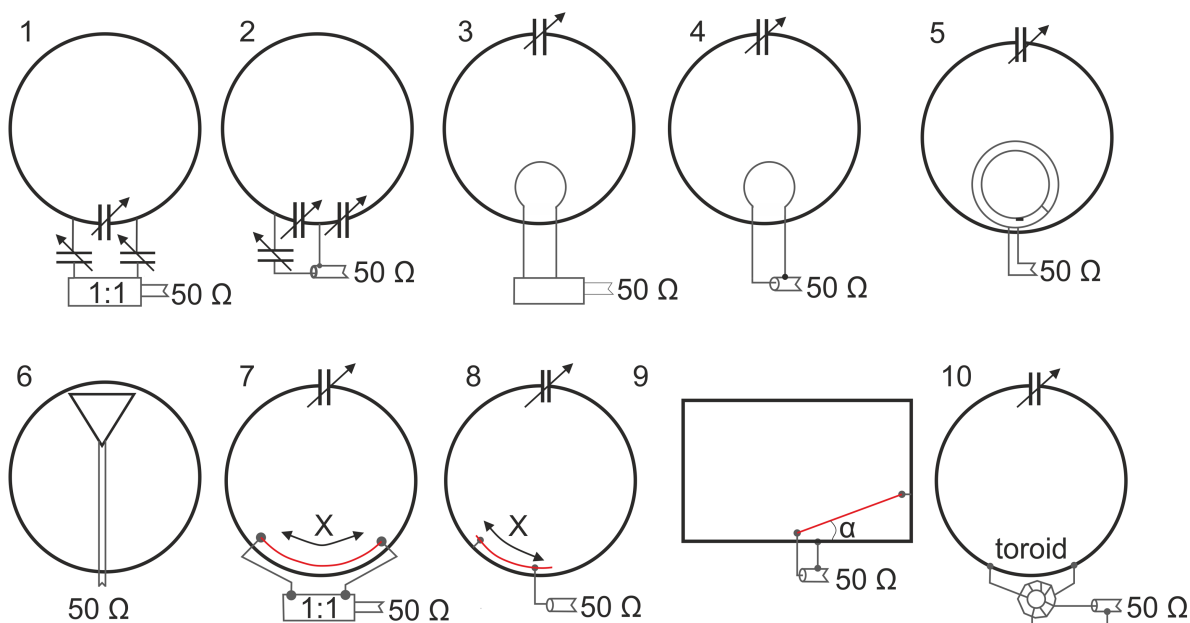
#### 1.2.1 Buzení pomocí indukční vazby

Nejběžněji používaný vazební obvod je představován indukční vazbou. Společně s hlavní smyčkou tvoří velmi jednoduchý transformátor. Vazební obvod realizovaný indukční vazbou má několik parametrů, které mohou ovlivnit buzení antény.

Jedním z těchto parametrů je *velikost* vazební smyčky. Tato velikost bývá stanovena jako  $\frac{1}{5}\lambda$ , ale není to striktně vyžadováno. Velikost smyčky ovlivňuje hlavně S11, tudíž je možné si velikost smyčky přizpůsobit.

*Tvar* smyčky může být stejně jako u hlavní smyčky různý. Běžný je kruhový tvar, ale může být rovněž čtvercový, oválný či trojúhelníkový.

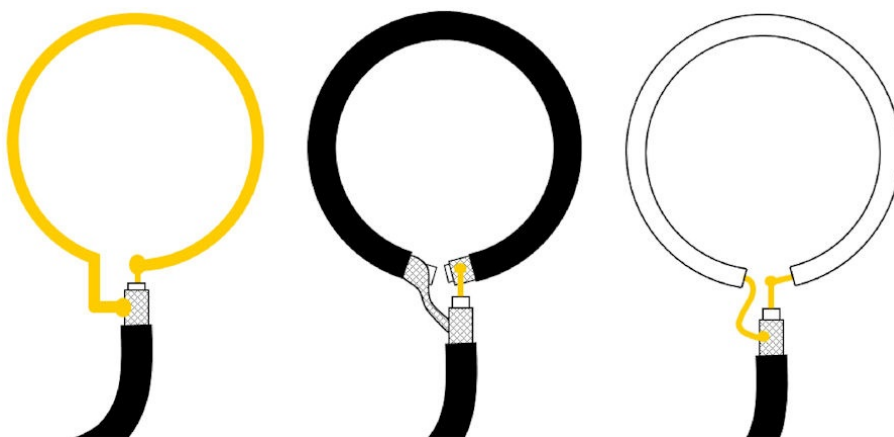
## 1. MAGNETICKÁ SMYČKOVÁ ANTÉNA



Obrázek 1.3: Příklady budících obvodů magnetické smyčkové antény[1]

*Umístění* smyčky také ovlivňuje vlastnosti buzení MLA. Standardně se vazební obvod umísťuje naproti ladícímu kondenzátoru co nejblíže k hlavní smyčce. Přesto může být vazební smyčka umístěna například přímo uprostřed hlavní smyčky.

Vliv na impedanční přizpůsobení má také to, jak je vazební obvod natočený vůči hlavní smyčce. Jinak se bude MLA chovat, pokud bude vazební obvod v rovině s hlavní smyčkou a jinak, pokud bude vychýlená o několik stupňů[1][9][10]. Existují dva druhy indukční vazby a to nestíněné



Obrázek 1.4: Druhy nestíněných indukčních vazeb[10]

a stíněné. **Nestíněná** indukční vazba je poměrně jednoduchá na výrobu. Může být použit vodič drát, který se spojí se stíněním a středním vodičem napájecího koaxiálního kabelu. Další variantou je možnost použití koaxiálního kabelu a využití jeho stínění. Další možností je použít

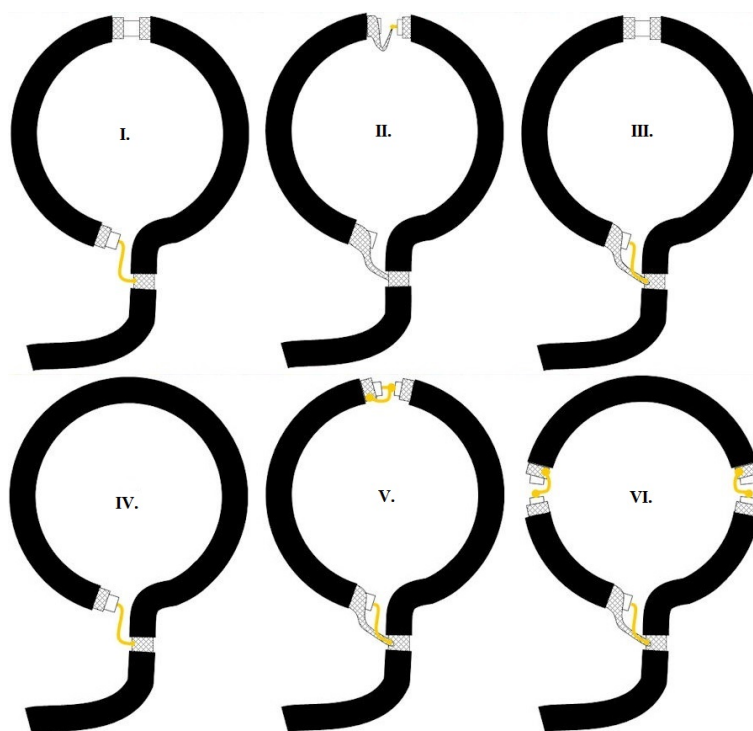
## 1. MAGNETICKÁ SMYČKOVÁ ANTÉNA

přímo středový vodič napájecího koaxiálního kabelu a připojit jej ke stínění. Tyto možnosti jsou ilustrovány níže na obrázku 1.4.

Lze se také setkat i s jinými provedením jako je například spirálovitá smyčka či smyčka připomínající věšák na kabát, díky čemuž si vysloužila v angličtině název "coat hanger"[10]. Novinkou je Triangle smyčka(obr. 1.3, č.6), která vznikla až nedávno a nebylo ji z časových důvodů možno do práce řádně zařadit. Impedanční přizpůsobení se ovlivňuje změnou úhlu natáčením vazební smyčky vůči hlavní smyčce[1].

**Stíněná** indukční vazba bývá také nazývána jako Faradayova vazební smyčka. V omezené míře snižuje příjem elektrické složky elektromagnetického pole. Tato přidaná hodnota se projevuje spíše u přijímací antény než u vysílací. V praxi se taková smyčka dá vyrobit pomocí koaxiálního kabelu.

Pro stejný poloměr vazební smyčky v případě provedení nestíněném či v různém provedení stíněném mají odlišné vlastnosti[1][10].



Obrázek 1.5: Příklady stíněné indukční vazby[10]

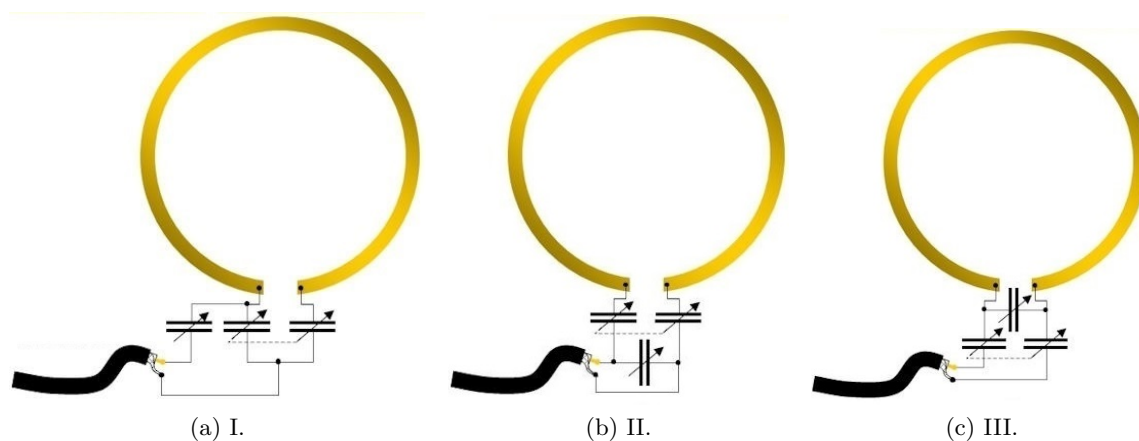
Různé variace stíněné indukční vazby jsou zobrazeny na obrázku 1.5. U varianty **IV** stínění koaxiální smyčky obklopuje tok vytvořený jednosměrnou cívkou tvořenou středním vodičem koaxiálního kabelu. To vyvolává napětí na stínění smyčky. Maximální napětí se vyskytuje v místě, kde stínění končí. Tato vazební smyčka vytváří a přijímá elektrické pole, které je primárně vertikálně polarizované. Ve variantě **V** levá a pravá polovina vazební smyčky vytváří opačné napětí,

## 1. MAGNETICKÁ SMYČKOVÁ ANTÉNA

což eliminuje přijímání a generování vertikálně polarizovaných polí E, ačkoliv je stále možný příjem a generace horizontálně polarizovaných polí E. V zásadě lze obě polarizace potlačit otevřením koaxiální smyčky na pozicích, jak je zobrazeno ve variantě VI[10].

### 1.2.2 Buzení pomocí kapacitní vazby - kapacitní dělič

Buzení pomocí kapacitní vazby se v podstatě skládá z několika kondenzátorů, typicky z jednoho či dvou ladících kondenzátorů a jednoho či dvou napájecích kondenzátorů. Ačkoliv se kapacitní vazba v praxi příliš nepoužívá, má tento typ vazebního obvodu pevnou konstrukci, což činí anténu efektivnější[1][10].



Obrázek 1.6: Příklady kapacitní vazby[10]

### 1.2.3 Buzení pomocí toroidního transformátoru

Tuto variantu napájení lze vyrobit tak, že na hlavní smyčku je navlečen prstenec z feritu (toroidní jádro). Sekundární vinutí transformátoru pak bude tvořeno jedním či více závity vodiče, jenž bude připojen k napájecímu koaxiálním kabelu. Buzení antény je tak prováděno toroidním proudovým transformátorem. U toho typu buzení tedy záleží na typu feritového materiálu, velikosti jádra, počtu závitů v sekundárním vinutí a počtu nahromaděných jader.

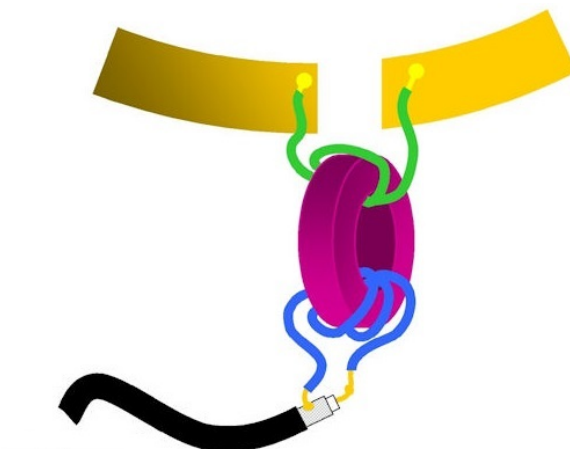
Výhodou tohoto typu buzení je to, že lze MLA jednodušeji širokopásmově impedančně přizpůsobit. To se podepíše na účinnosti samotné antény. Další výhodou je, že toroidní transformátor je malá součástka a společně s ladícím kondenzátorem ji lze uložit do malé krabičky. Umístění transformátoru neovlivňuje zisk antény, nýbrž transformační poměry. Navíc přenosu energie ze sekundárního vinutí transformátoru do obvodu smyčky MLA nebrání přechodové odpory, které by mohly ovlivnit účinnost antény. Musíme také dbát na vhodnou volbu materiálu toroidu, přičemž platí, že čím je materiál horší, tím lépe se anténa přizpůsobuje.

Můžeme pro konstrukci použít transformátory  $1 : 1$  a  $1 : N$  (kde  $N = 1 \dots x$ ), které jsou vyobrazeny na obrázku 1.7[1][9][10].



Obrázek 1.7: Příklady buzení toroidním transformátorem[10]

Další variantou je pak transformátor s poměrem  $N:M$  (kde  $N = 1 \dots x$  a  $M = 1 \dots y$ ), kdy se použije malé množství závitů primárního vedení. Je však nutné, aby hlavní smyčka byla otevřená a primární vedení bylo připojeno na konce otevřené smyčky[10]. Toto můžeme vidět na obrázku 1.8.



Obrázek 1.8: Příklady buzení toroidním transformátorem  $N:M$ [10]

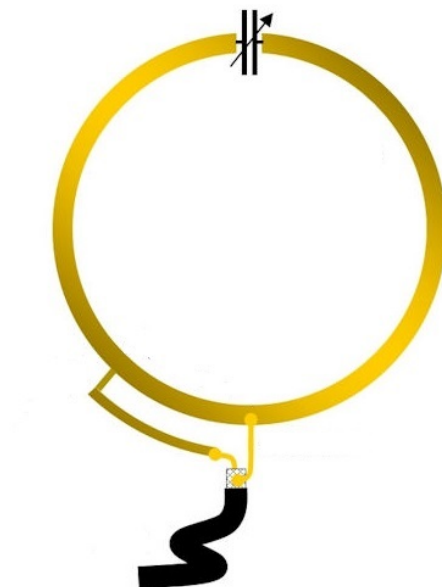
### 1.2.4 Buzení pomocí *GAMA* pahýlu

Již dříve bylo zmíněno v podkapitole 1.1, že proud v hlavní smyčce je konstantní. S napětím se to má tak, že maxima nabývá v bodě, kde se nalézá ladící kondenzátor. Distribuce napětí je symetrická vzhledem k neutrálnímu bodu  $V = 0$ , který se nalézá naproti ladícímu kondenzátoru. Tento bod slouží také jako referenční bod. Pokud se z tohoto bodu na hlavní smyčce přesuneme jinam, brzy nalezneme místo, kde odpor nabývá hodnot  $50 \Omega$  vzhledem k referenčnímu bodu.

## 1. MAGNETICKÁ SMYČKOVÁ ANTÉNA

---

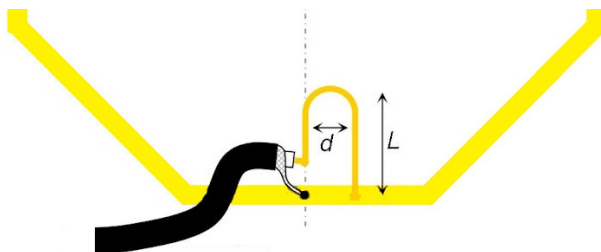
Tento bod nalezneme i na druhé straně referenčního bodu díky symetrii. Tohoto poznatku lze využít při typu buzení pomocí *GAMA* pahýlu.



Obrázek 1.9: Příklad buzení pomocí *GAMA* pahýlu[10]

Princip buzení tohoto typu je v tom, že se stínění napaječe připojí na obvod hlavní smyčky v referenčním bodě a střední vodič napaječe je protažen, přičemž kopíruje zakřivení smyčky, a je připojen pomocí pahýlu k hlavní smyčce v určité vzdálenosti od připojeného stínění. Takovýto posun zkratu má vliv na  $S_{11}$  stejně jako průměry obou vodičů[1][10]. Typ tohoto zapojení můžeme spatřit na obrázku 1.9.

Tento typ buzení se liší od ostatních typů buzení tím, že buzení je připojeno přímo na tělo hlavní smyčky. Toto buzení je asymetrické, proto bude vyzařovací charakteristika lehce ovlivněna touto asymetrií. Je třeba si také pamatovat, že místo připojení středního vodiče koaxiálního kabelu je ovlivněno vlastnostmi pahýlu jako například jeho průměr, obvod hlavní smyčky, tvar tvořený pahýlem a vodičem a tak dále. I zde existuje několik různých provedení. Jako první je takzvaný



Obrázek 1.10: Příklad buzení pomocí *Hairpin* pahýlu[10]

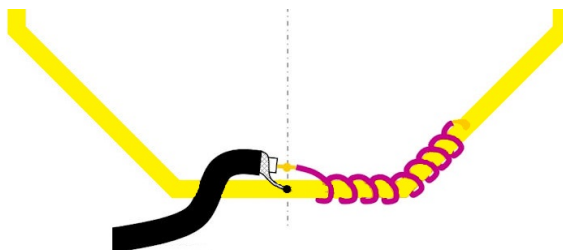
*Hairpin Match*, kdy se předpokládá, že vodič připojený k pahýlu je určitou formou smyčky. Pokud je bod připojení středního vodiče blízko k referenčnímu bodu, ale zachováme velikost

## 1. MAGNETICKÁ SMYČKOVÁ ANTÉNA

---

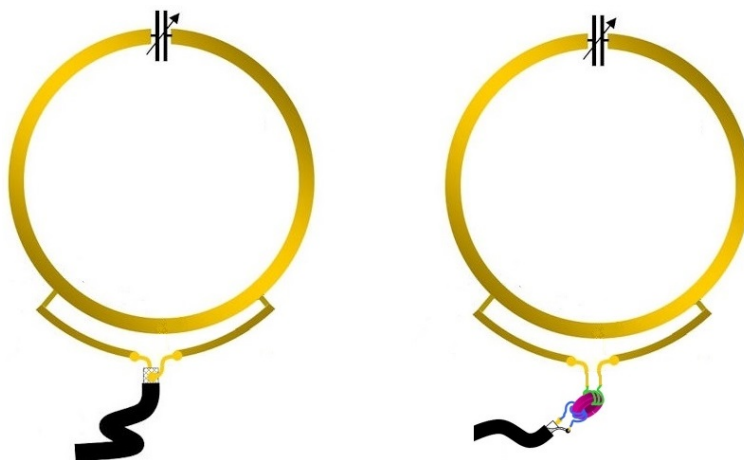
smyčky (vzdálenost od hlavní smyčky a délku protaženého středního vodiče), potom dostaneme Hairpin Match (obrázek 1.10).

Další formou *GAMA* pahýlu je takzvaný "*Twisted*" *Gamma Match*, kdy se střední vodič omotá kolem těla hlavní smyčky do spirály (obrázek 1.11).



Obrázek 1.11: Příklad buzení pomocí Twisted *GAMA* pahýlu[10]

Jinou variantou je *T-Match*, kdy se symetricky na obou stranách smyčky vzhledem k referenčnímu bodu (ve tvaru písmena T) připojí napájení ke dvěma pahýlům umístěným v požadované vzdálenosti. Zde se navíc nabízí vylepšení o toroidní transformátor N:M (obrázek 1.12)[10].



Obrázek 1.12: Příklad buzení pomocí *T* pahýlu[10]

Lambda pahýl (obr. 1.3, č.9), který je principiálně blízký *GAMA* pahýlu a liší se pouze geometricky, je použitelný spíše pro smyčky tvaru čtverce či obdélníku[1].

## 2 Softwarová analýza budících obvodů

Tato kapitola se věnuje návrhu antény (ve stručnosti) v softwarovém nástroji CST Studio a také analyzuje možnosti ladění magnetické smyčkové antény u vybraných typů budících obvodů.

### 2.1 Návrh magnetické smyčkové antény

Magnetická smyčková anténa je ve své podstatě velmi jednoduchá na vymodelování. Může se jednat o kruh, čtverec, obdélník a jiné.

V našem případě se jedná o kruhovou MLA pro frekvenci 14 MHz, pro kterou budeme následně modelovat a simulovat vybrané budící obvody. Je nutné si uvědomit, že obvod hlavní smyčky je odvozen z vlnové délky, pro kterou anténu koncipujeme. Pro tento model MLA byla zvolena velikost 12% vlnové délky. Taková délka obvodu hlavní smyčky plně postačuje.

V CST Studiu lze využít možnost vymodelovat kruh s daným průměrem. Níže v tabulce 2.1 jsou uvedeny použité parametry smyčky.

Tabulka 2.1: Použité parametry v CST Studiu

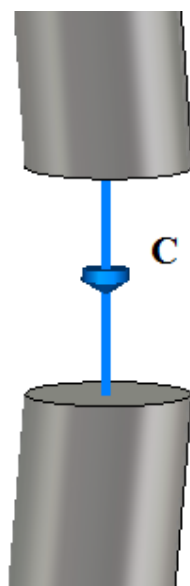
Parametr	Hodnota
<i>wire_diameter</i>	0,022 m
<i>wavelength_centre</i>	21,4137 m
<i>loop_radius</i>	0,408972 m
<i>loop_circumference</i>	2,56964 m
<i>frequency_centre</i>	14 MHz

Mezi parametry hlavní smyčky můžeme považovat *wire\_diameter*, což je průměr vodiče či trubky. Dále pak *frequency\_centre* je pracovní frekvence, pro kterou chceme anténu navrhnout, *wavelength\_centre* odpovídá odvozené vlnové délce z daného kmitočtu. *Loop\_circumference* je parametr udávající hodnotu obvodu hlavní smyčky, vypočtené z vlnové délky a vynásobené parametrem 0,12. Z toho pak vypočítáme poloměr hlavní smyčky pro vykonstruování modelu *loop\_radius*, jak je uvedeno v tabulce 2.1. Všechny výše zmíněné hodnoty parametrů vychází z příkladu výpočtu MLA z knihy Magnetická smyčková anténa: pokaždé trochu jinak[1].

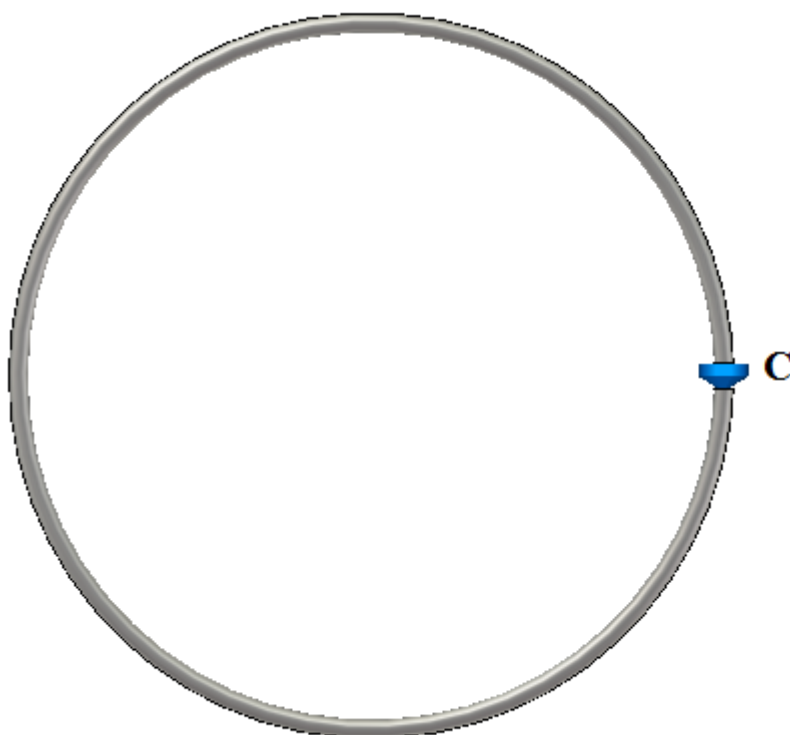
Dále je ještě nutné počítat s umístěním ladícího kondenzátoru, pro který byl použit soustředěný port (Lumped element), jehož způsob zapojení je vyobrazen na obrázku 2.1. Jako zdroj napájení byl použit diskretní port.

Další modelování závisí na tom, jaký typ budícího obvodu použijeme. Tímto máme nachystanou hlavní smyčku s ladícím kondenzátorem (obrázek 2.2).





Obrázek 2.1: Způsob připojení soustředěného portu



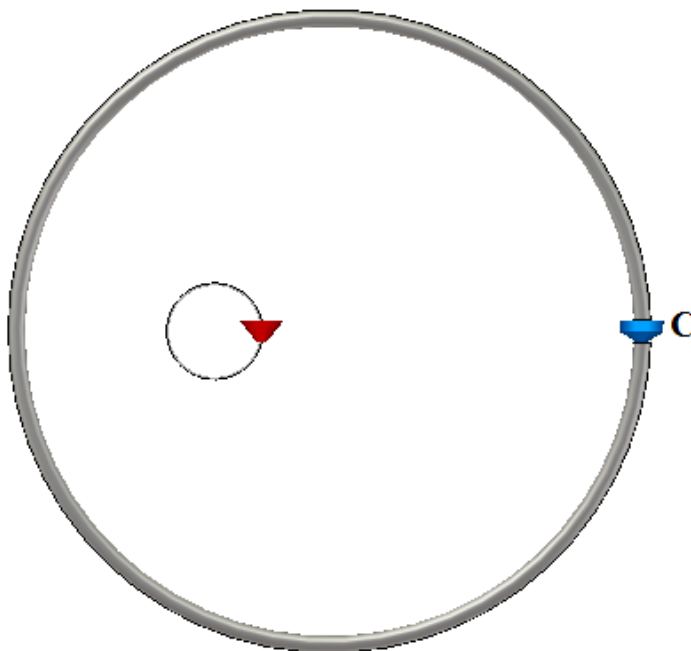
Obrázek 2.2: Model MLA bez použitého budícího obvodu

### 2.2 Modelování a ladění vybraných budících obvodů

U magnetické smyčkové antény je v závislosti na použitém budícím obvodu možné využít jednotlivé prvky k odladění antény jak na požadovaný kmitočet, tak i hodnoty  $S_{11}$ . Tato podkapitola popisuje možnosti ladění budících obvodů. V této části byly vybrány k dalšímu zpracování budící obvody nestíněné a stíněné indukční vazby, kapacitní vazby, vazby s *GAMA* pahýlem a vazba s toroidním transformátorem. Důvodem k jejich výběru je fakt, že jsou to velmi používané varianty.

#### 2.2.1 Analýza indukční vazby

Vymodelování vazební smyčky je obdobné, jako při modelování hlavní smyčky. Rozdíl je ve velikosti, která by měla být zhruba pětina oproti hlavní smyčce (viz. podkapitola 1.2.1). Velikost vazební může být i třetina, případně osmina. Na obrázku 2.3 je vyobrazen vytvořený model antény s vymodelovanou vazební smyčkou. Zde si můžeme všimnout s ohledem na schéma zapojení na obrázku 1.2, že se jedná v podstatě o transformátor se vzduchovou mezerou.



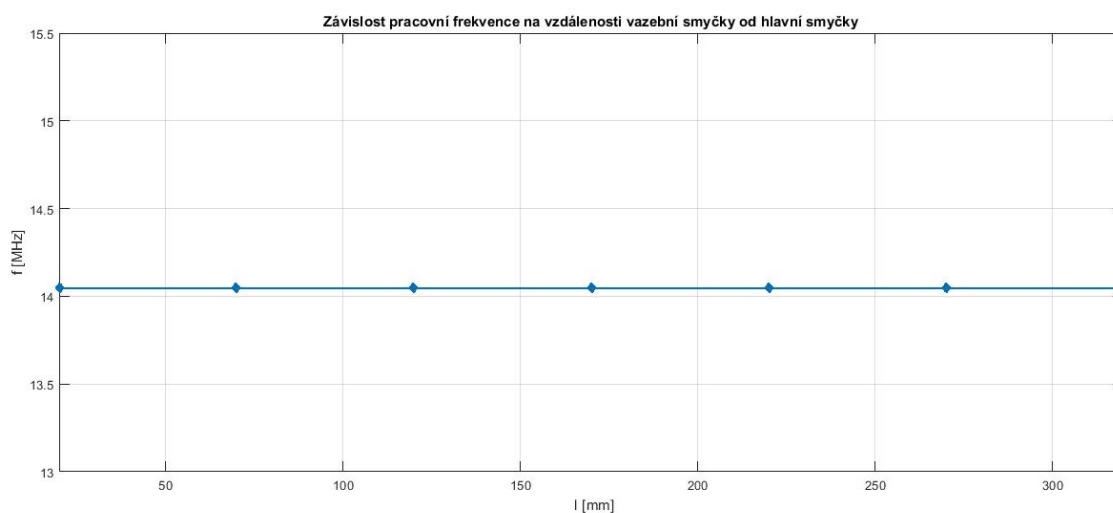
Obrázek 2.3: Model MLA s vazební smyčkou

Jednotlivými ladícími prvky u indukční vazby je samotná vazební smyčka a ladící kondenzátor. Hodnotu  $S_{11}$  ovlivňuje jednak umístění smyčky, jednak natočení smyčky a pak také i pozice napájení. Mírně se projevuje i průměr samotné smyčky.

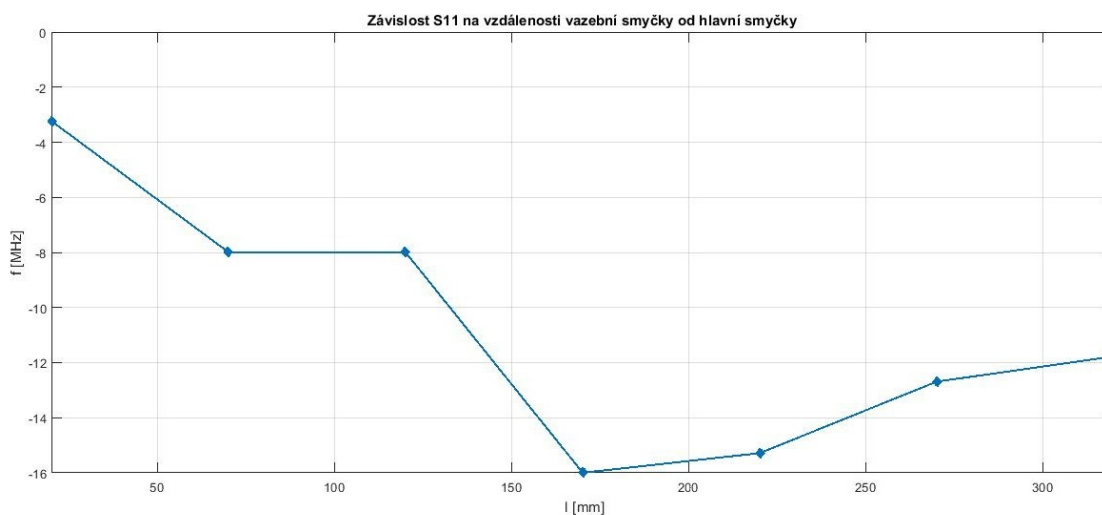
Jednou z možností ladění je pozice vazební smyčky v prostoru mezi tělem hlavní smyčky a jejím středem. V simulacích se osvědčily pozice vazební smyčky blíže ke středu v prostoru hlavní

## 2. SOFTWAREVÁ ANALÝZA BUDÍCÍCH OBVODŮ

smyčky, což poukazuje na větší vliv souososti smyček než na vliv blízkosti obou smyček. Porovnání můžeme najít na obrázcích 2.4 a 2.5. Z výsledků na obrázku 2.4 vidíme, že rezonanční frekvence se s pozicí nemění. Na obrázku 2.5 si můžeme všimnout, že okolo  $0,008\lambda$  je hodnota S11 nejnížší. Detailní hodnoty můžeme najít v tabulce 2.2. Z konstručního hlediska je pak zřejmé, že vazební smyčku musíme upevnit na tyč z dielektrického materiálu, pomocí níž budeme moci měnit pozici smyčky.



Obrázek 2.4: Graf závislosti rezonanční frekvence na vzdálenosti vazební smyčky od hlavní smyčky



Obrázek 2.5: Graf závislosti hodnoty S11 při rezonančním kmitočtu 14 MHz na vzdálenosti vazební smyčky od hlavní smyčky

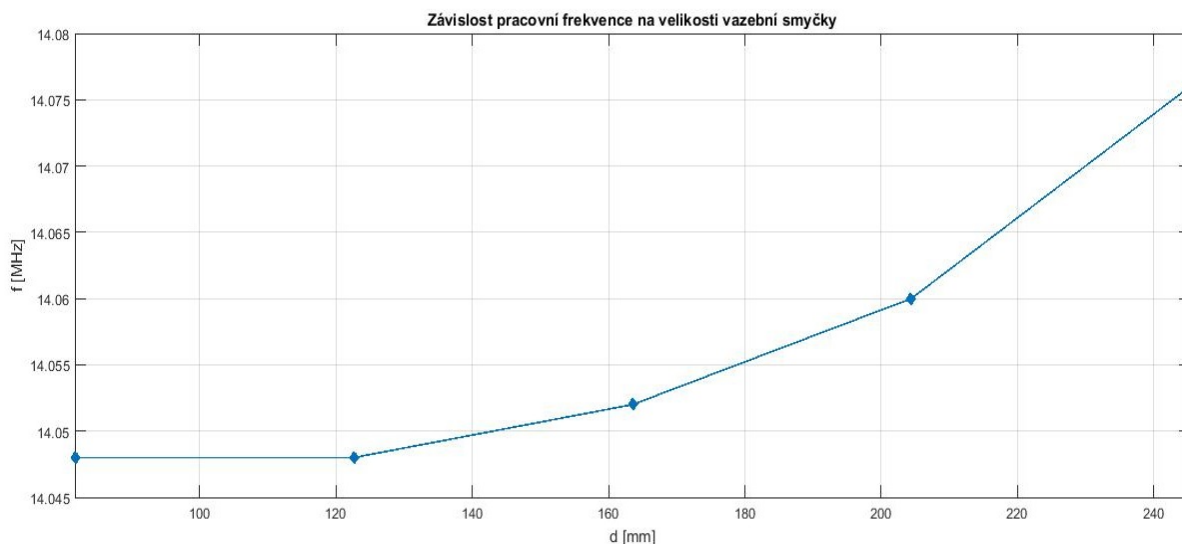
## 2. SOFTWAREVÁ ANALÝZA BUDÍCÍCH OBVODŮ

Tabulka 2.2: Hodnoty rezonanční frekvence a S11 pro grafy 2.4 a 2.5

l [mm]	f [MHz]	S11 [dB]
20	14,048	-3,231
70	14,048	-7,993
120	14,048	-7,995
170	14,048	-15,996
220	14,048	-15,285
270	14,048	-12,689
320	14,048	-11,775

Nadále budeme další možnosti ladění porovnávat s variantou, kde vzdálenost vazební smyčky od hlavní smyčky činí 170 mm, neboť zde bylo dosaženo nejlepšího impedančního přizpůsobení. Dále je možné měnit úhel natočení vazební smyčky vůči hlavní smyčce. Z analýzy provedených simulací vyplývá, že lepší vazbu mezi hlavní smyčkou a vazební smyčkou najdeme, pokud jsou obě smyčky ve stejné rovině. Pak existuje mezi smyčkami maximální vazba.

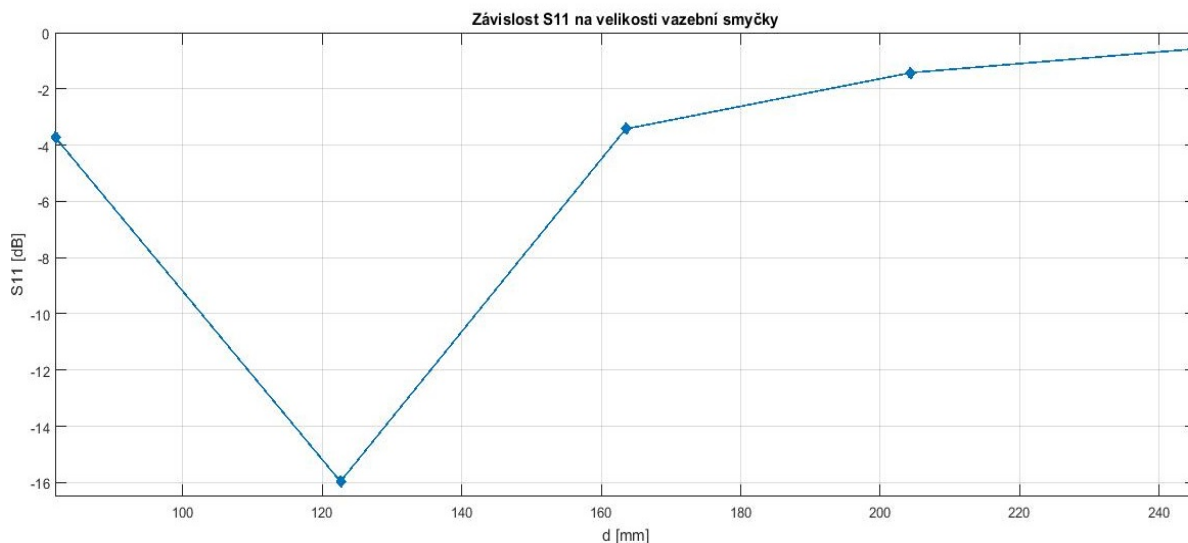
Na S11 má také vliv, kde se bude nacházet napájecí bod na vazební smyčce. Ze simulací vyplývá, že je lepší umístit napájecí bod tak, aby se nacházel v prostoru dále od těla hlavní smyčky. To je nejspíš dáno tím, že právě v místě napájení je smyčka přerušena kvůli umístění diskretnímu portu. To může oslabovat vzájemnou vazbu mezi smyčkami.



Obrázek 2.6: Graf závislosti rezonanční frekvence na průměru vazební smyčky

Dalším parametrem je pak velikost vazební smyčky, která, jak již bylo uvedeno výše, nemusí být striktně pětinnová. Na obrázku 2.6 vidíme, jak se mění rezonanční frekvence, kde se změna odehrává v řádu setin dle velikosti vazební smyčky. Na obrázku 2.7 pak vidíme vývoj hodnot S11

## 2. SOFTWAREVÁ ANALÝZA BUDÍCÍCH OBVODŮ



Obrázek 2.7: Graf závislosti hodnoty S11 při rezonanční frekvenci 14 MHz na průměru vazební smyčky

Tabulka 2.3: Hodnoty rezonanční frekvence a S11 pro grafy 2.6 a 2.7

d [mm]	f [MHz]	S11 [dB]
81,7	14,048	-3,718
122,6	14,048	-15,966
163,5	14,052	-3,426
204,4	14,06	-1,425
245,3	14,076	-0,575

při konstantní hodnotě kapacity. Z toho vyplývá, že pro jinou velikost vazební smyčky by bylo potřeba znovu odladit hodnotu kapacity ladícího kondenzátoru. Přesnější hodnoty nalezneme v tabulce 2.3.

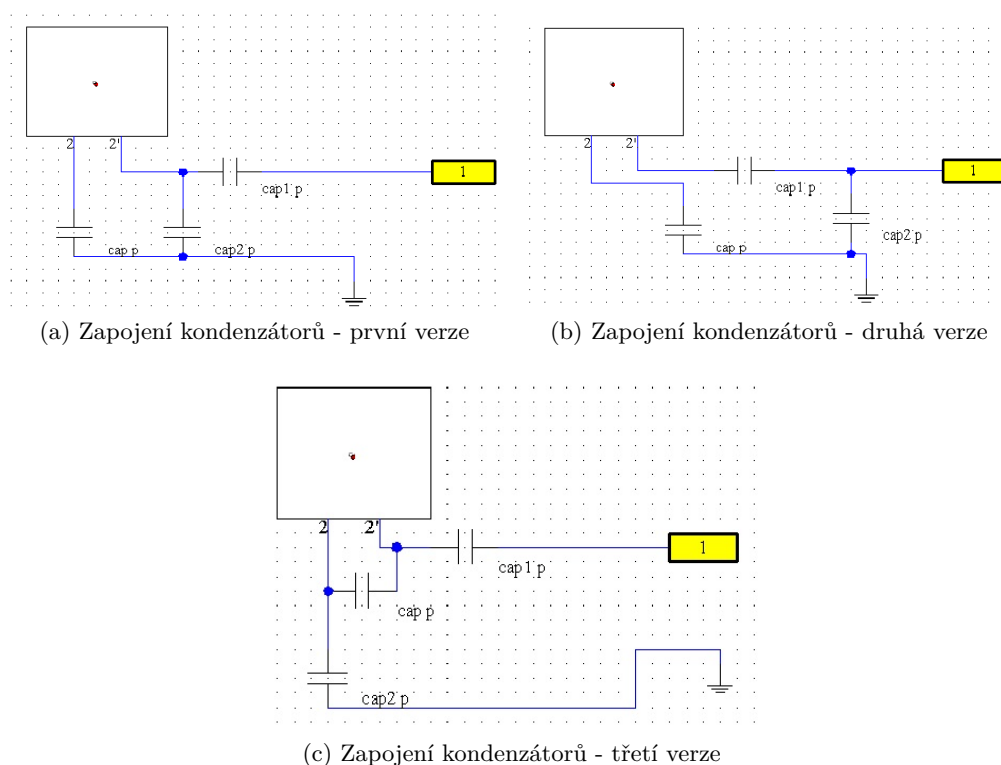
Po srovnání výsledků z obrázku 2.7 brzy zjistíme, že pro co nejlepší vyladění MLA je třeba nastavit všechny parametry tak, aby nám ve společném souladu poskytly nejlepší impedanční přizpůsobení. Pokud u dosavadního modelu při určitých konstantních parametrech změním jediný z nich, tak nám změna právě onoho parametru může změnit hodnotu S11 nežádoucím způsobem.

Se změnou hodnoty ladícího kondenzátoru se nemění jen hodnota koeficientu odrazu, ale také i rezonanční frekvence MLA.

Pro zajímavost ještě proběhla simulace ohledně velikosti hlavní smyčky, kdy byla změněna hodnota průměru hlavní smyčky (rozsah 0,1 – 0,3 vlnové délky) a ostatní parametry zůstaly konstantní. Výsledkem je, že pokud je hlavní smyčka menší, zvyšuje se rezonanční frekvence MLA. Tyto vlastnosti platí jak pro nestíněnou variantu, tak i pro stíněnou variantu indukční vazby.

### 2.2.2 Analýza kapacitní vazby

Vymodelování kapacitní vazby je velmi jednoduché, neboť zde lze využít část CST Studia schémata, kde lze nakreslit zapojení a připojit jej k diskretnímu portu modelu antény a ke zdroji. Na obrázcích 2.8 jsou uvedena ověřená zapojení, která jsou zobrazena výše na obrázcích 1.6a (odpovídá obr. 2.8a), 1.6b(odpovídá obr. 2.8b) a 1.6c(odpovídá obr. 2.8c). Model antény je tedy totožný s uvedeným na obrázku 2.2.

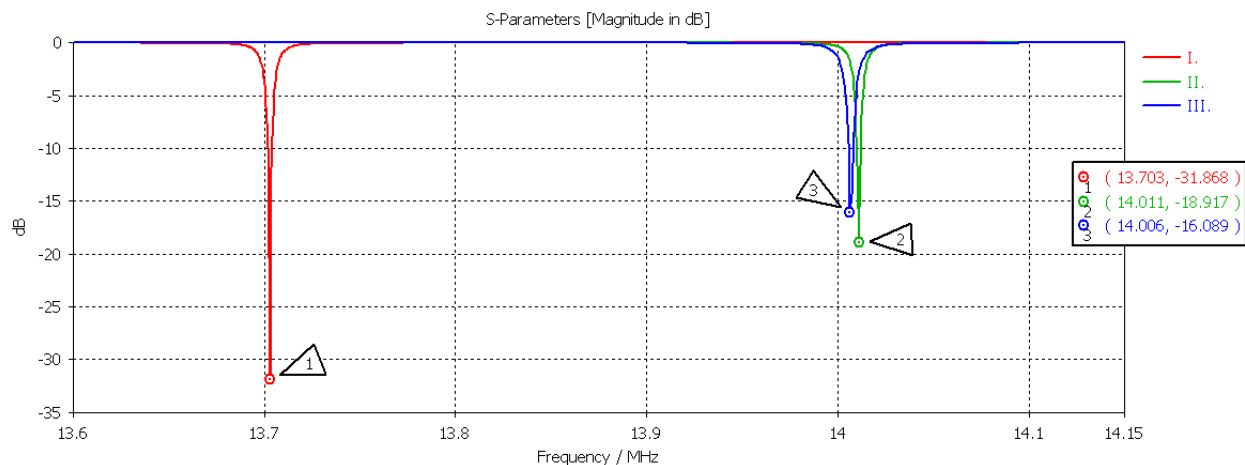


Obrázek 2.8: Příklad zapojení v CST Studiu

Koeficient odrazu  $S_{11}$  u kapacitní vazby lze ovlivnit pouze pomocí zapojení kondenzátorů a nastavení jejich hodnot. Ze simulací vyplývá, že každé zapojení má jiný vliv na parametr  $S_{11}$ . Během ladění hodnot kondenzátorů bylo zjištěno, že kondenzátor zapojený sériově ke zdroji ovlivňuje zejména hodnotu  $S_{11}$ , ačkoliv má vliv i na rezonanční frekvenci. Dále kondenzátor připojený sériově k zemi ovlivňuje zejména frekvenční naladění antény. Se zvýšením hodnoty kapacity klesá rezonanční frekvence. Kondenzátor připojený paralelně ke zdroji také ovlivňuje rezonanční frekvenci antény. Ladění pak pomocí tohoto kondenzátoru umožňuje přesnější naladění rezonanční frekvence.

Při softwarové analýze pro výše uvedená zapojení kondenzátorů bylo dosaženo nejlepšího výsledku při prvním zapojení, kde hodnota  $S_{11}$  činí -31,85 dB, což se odráží i na průběhu impedance ve Smithově diagramu zobrazenou na obrázku 3.1, kde je fialovou barvou vynesena referenční hodnota PSV 1,5. Při srovnání výsledků s ostatními vazbami (obrázky 3.2 a 3.3) vidíme, že

## 2. SOFTWAREVÁ ANALÝZA BUDÍCÍCH OBVODŮ

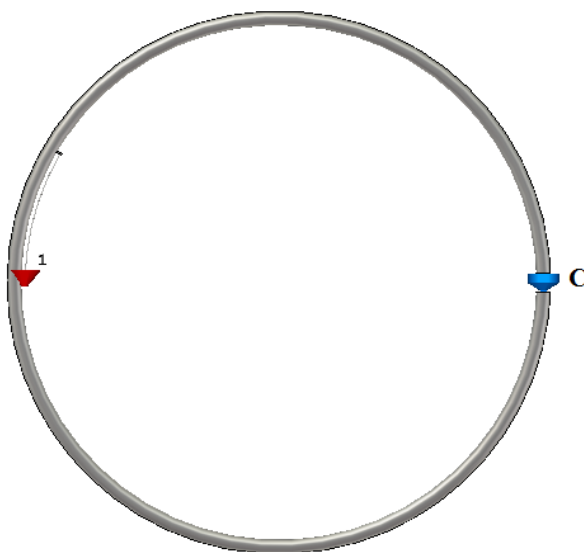


Obrázek 2.9: Graf frekvenční závislosti hodnoty S11 pro vybrané zapojení kapacitní vazby

u prvního zapojení bylo dosaženo nejlepšího impedančního přizpůsobení. Srovnání hodnot impedančních přizpůsobení je možné i z obrázku 2.9, kde jsou vyznačeny průběhy S11. Lze soudit, že i zapojení kondenzátorů má vliv na impedanční přizpůsobení MLA.

### 2.2.3 Analýza vazby s *GAMA* pahýlem

*GAMA* pahýl lze sestavit jako křivku kopírující hlavní smyčku připojenou ke smyčce ve dvou bodech. Představu o tom, jak dlouhá by měla být, můžeme najít v některých literaturách[10], kde se uvádí, že by pahýl měl být situován v místě vzdáleném  $\frac{\lambda}{10}$  od napájecího bodu[10]. Délku samotného pahýlu(případně vzdálenost křivky od hlavní smyčky) je spočítat nalézt jako  $\frac{\lambda}{200}$ [10].

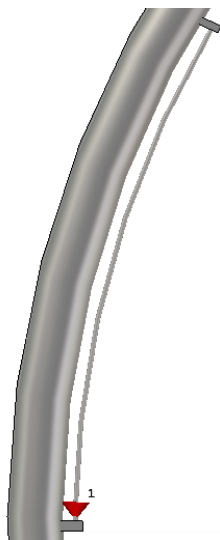


Obrázek 2.10: Ukázka MLA s *GAMA* pahýlem

## 2. SOFTWAREVÁ ANALÝZA BUDÍCÍCH OBVODŮ

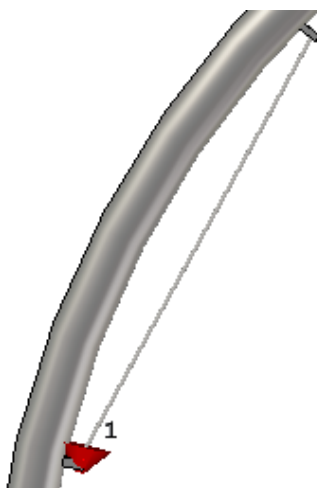
---

Je nutné dodat, že výše zmíněné délky nemusí platit, neboť u pahýlu záleží jak na tvaru, tak na délce pahýlu či na průměru vodiče nebo také i na tvaru samotné hlavní smyčky. Tudíž umístění pahýlu není jednoznačné.



Obrázek 2.11: Detail *GAMA* pahýlu

U *GAMA* pahýlu má vliv na impedanční přizpůsobení i tvar samotného pahýlu. Zatímco provedení na obrázku 2.11 kopíruje tvar hlavní smyčky, provedení na obrázku 2.12 ukazuje příčné provedení, které body připojení k hlavní smyčce spojuje přímo bez kopírování tvaru antény. Toto použití však vykazuje mnohem horší výsledky hodnoty  $S_{11}$  než u tvaru opisujícího hlavní smyčku.

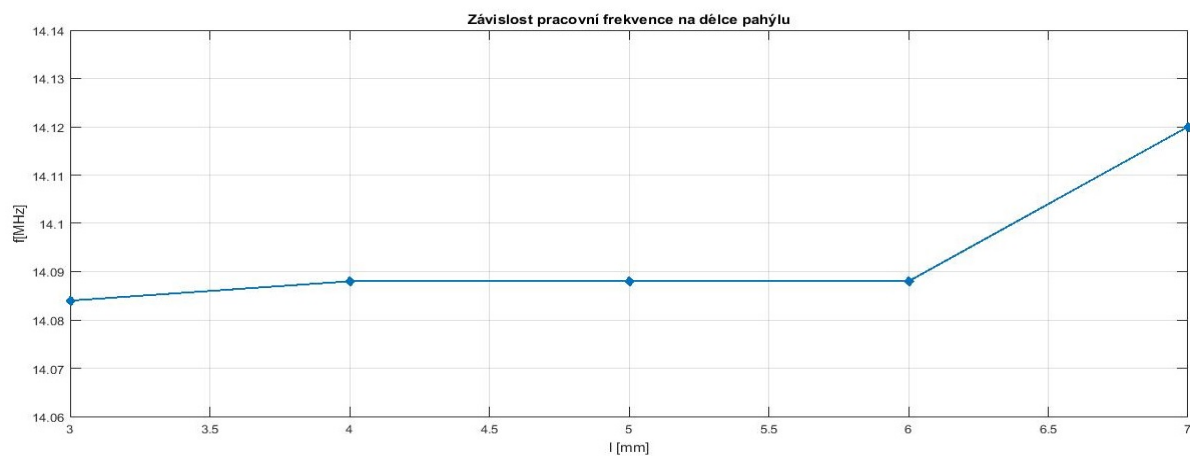


Obrázek 2.12: Detail *GAMA* pahýlu - příčné provedení

Vliv na impedanční přizpůsobení má také délka pahýlu (resp. vzdálenost vodiče od hlavní smyčky). Zde je potřeba říct, že zde závisí i na průměru vodiče pahýlu. Na obrázcích 2.13 a 2.14

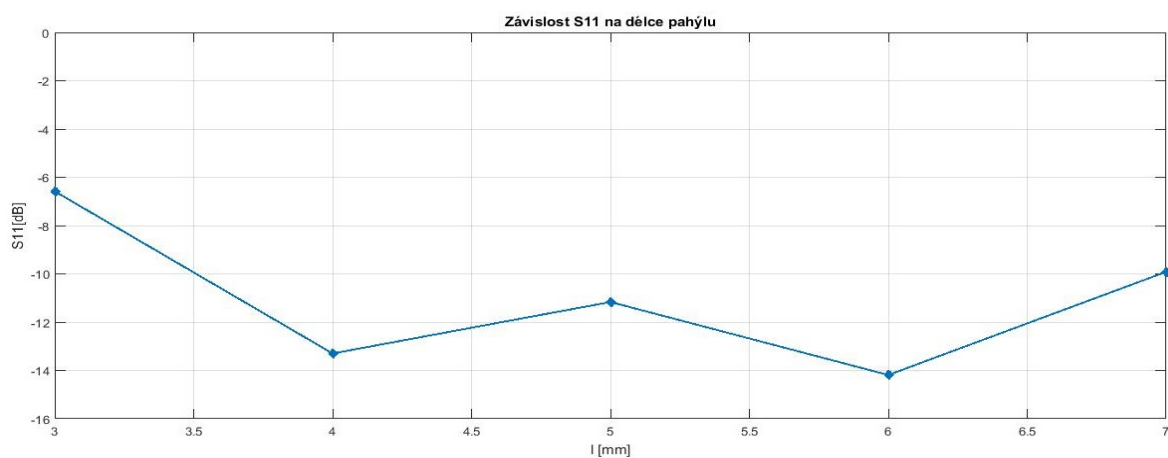


## 2. SOFTWAREVÁ ANALÝZA BUDÍCÍCH OBVODŮ



Obrázek 2.13: Graf závislosti rezonanční frekvence na délce pahýlu

je zobrazeno, jak se s délkou pahýlu mění rezonanční frekvence a S11 při konstantní hodnotě průměru vodiče 2 mm a vzdáleností mezi připojením stínění a středního vodiče 202 mm. Frekvence se vzrůstající vzdáleností nepatrně roste. Přesné hodnoty k obrázkům lze nalézt v tabulce 2.4.

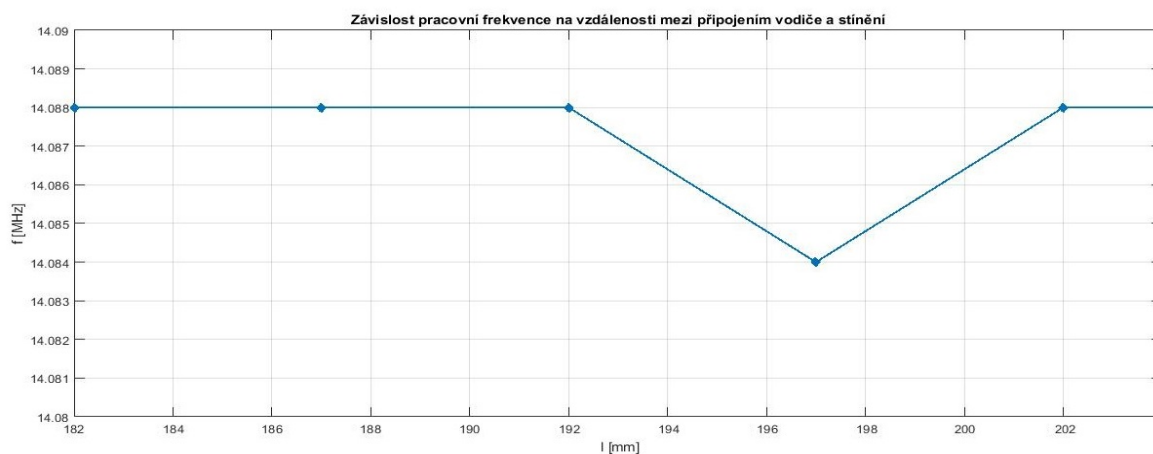


Obrázek 2.14: Graf závislosti minimálních hodnot S11 na délce pahýlu

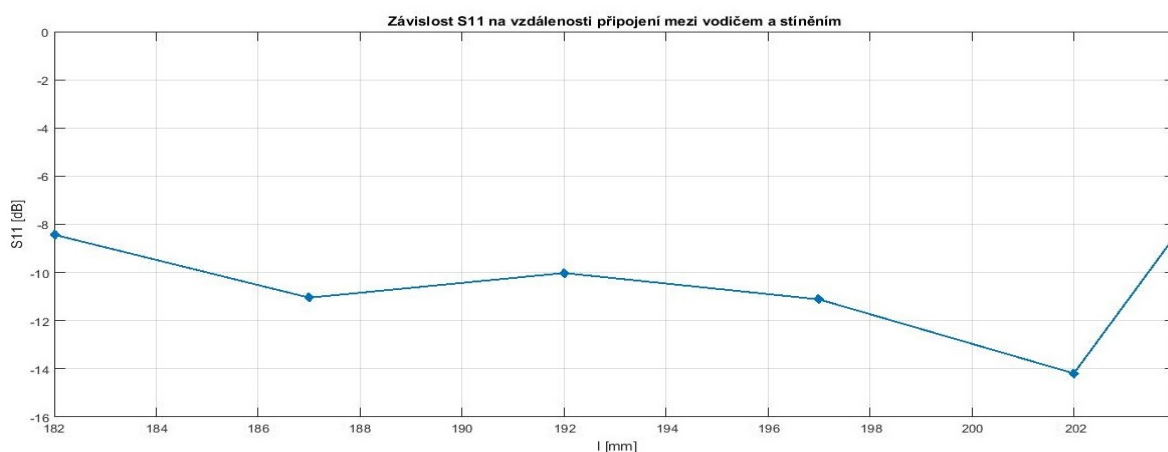
Tabulka 2.4: Hodnoty rezonanční frekvence a S11 pro grafy 2.13 a 2.14

l [mm]	f [MHz]	S11 [dB]
3	14,084	-6,582
4	14,088	-13,297
5	14,088	-11,165
6	14,088	-14,188
7	14,12	-9,915

## 2. SOFTWAREVÁ ANALÝZA BUDÍCÍCH OBVODŮ



Obrázek 2.15: Graf závislosti rezonanční frekvence na vzdálenosti mezi připojením středním vodičem a stíněním



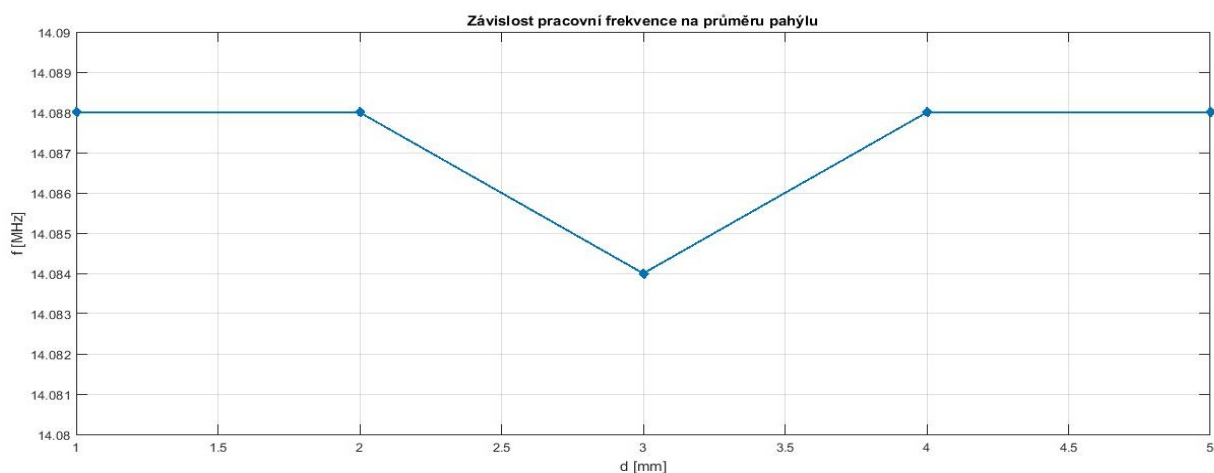
Obrázek 2.16: Graf závislosti S11 na vzdálenosti mezi připojením středním vodičem a stíněním

Tabulka 2.5: Hodnoty rezonanční frekvence a S11 pro grafy 2.15 a 2.16

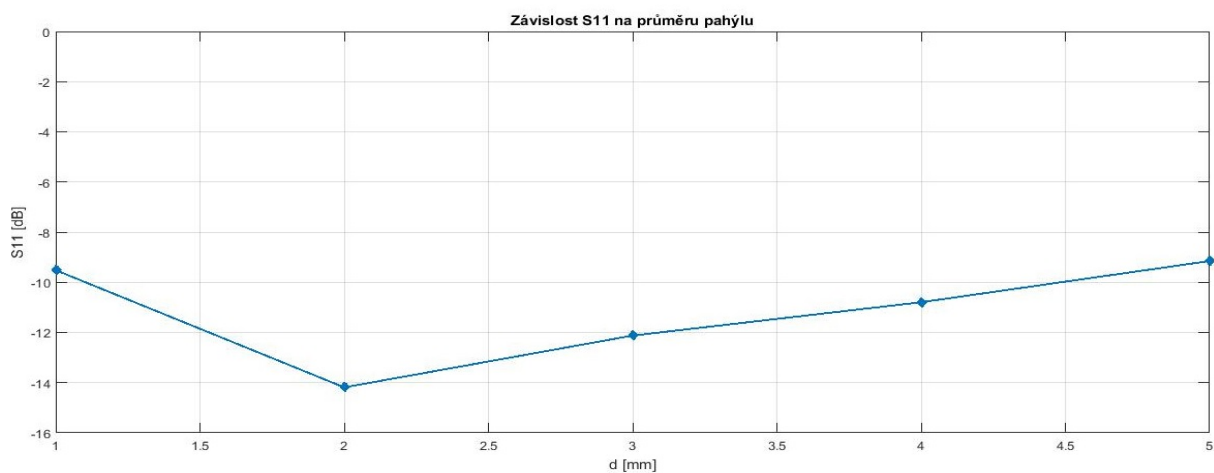
l [mm]	f [MHz]	S11 [dB]
182	14,088	-8,431
187	14,088	-11,044
192	14,088	-10,021
197	14,084	-11,114
202	14,088	-14,188
204	14,088	-8,441

Na obrázcích 2.15 a 2.16 je závislost rezonanční frekvence a S11 na vzdálenosti mezi připojením středního vodiče a stínění při konstantní hodnotě průměru vodiče 2 mm a délkou pahýlu 6 mm.. Frekvence se mění jen v řádu setin. Hodnoty k obrázkům lze nalézt v tabulce 2.5.

## 2. SOFTWAREVÁ ANALÝZA BUDÍCÍCH OBVODŮ



Obrázek 2.17: Graf závislosti rezonanční frekvence na průměru vodiče



Obrázek 2.18: Graf závislosti minimálních hodnot S11 na průměru vodiče

Tabulka 2.6: Hodnoty rezonanční frekvence a S11 pro grafy 2.17 a 2.18

l [mm]	f [MHz]	S11 [dB]
1	14,088	-9,516
2	14,088	-14,188
3	14,084	-12,123
4	14,088	-10,794
5	14,088	-9,151

Na obrázcích 2.17 a 2.18 je zobrazeno, jak se s odlišným průměrem vodiče mění rezonanční frekvence a S11 při konstantní hodnotě délky pahýlu 6 mm a vzdáleností mezi připojením stínění a středního vodiče 202 mm. Stejně jako v předchozím případě se frekvence výrazně nemění. Hodnoty k obrázkům lze nalézt v tabulce 2.6.

Jak vidíme, budící obvod s *GAMA* pahýlem je podobně komplexní, co se týče ladění, jako u indukční vazby. Parametry u *GAMA* pahýlu se však zdají být více provázány.

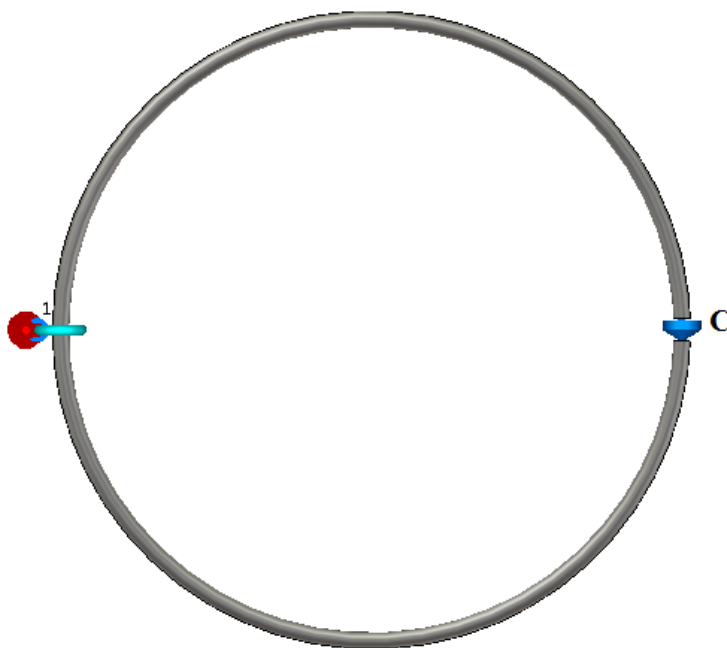
### 2.2.4 Analýza vazby s toroidním transformátorem

U tohoto typu budícího obvodu je potřebné vymodelovat toroidní jádro a pak samotné závity. Toroidní jádro je v podstatě opět vymodelováno jako kruh. Jeho materiál pak musí odpovídat toroidu. Materiál také ovlivňuje vlastnosti antény. Závity mohou být vymodelovány jako šroubovice pomocí makra.

Pro účely simulace toroidního materiálu byl zvolen ferit HF90 s permeabilitou  $5000 \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$ .

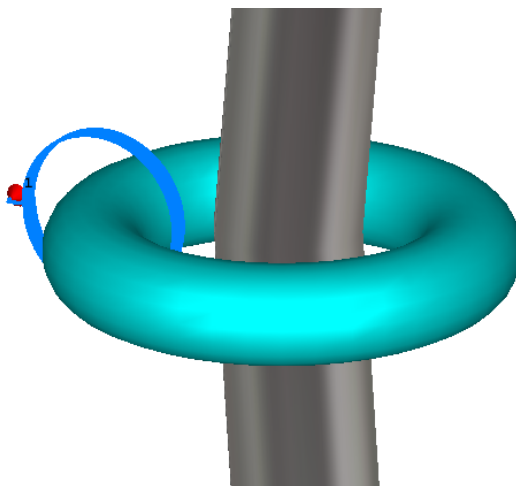
U toroidního tranformátoru není mnoho možností, jak ovlivnit koeficient odrazu  $S_{11}$ . Kromě ladícího kondenzátoru můžeme ještě ladit rezonanční frekvenci a impedanční přizpůsobení pomocí počtu závitů navinutých na jádro.

Zde si však můžeme všimnout, že výsledky jsou pro každý počet závitů jiné. Nelze tvrdit, že například se zvyšováním počtu závitů hodnota  $S_{11}$  klesá, neboť už z výsledků simulací je patrné, že pro každý počet závitů vychází jiný výsledek.



Obrázek 2.19: Ukázka MLA toroidním transformátorem

Jako první byl odsimulován v podstatě typ toroidního transformátoru 1 : 1. Hodnota  $S_{11}$  je -5,761 dB. Další simulace již proběhly pro toroidní transformátor 1:N. Na obrázku 2.22 vidíme výsledky pro více závitů. S postupným přidáváním závitů hodnota  $S_{11}$  klesá. Poté okolo osmi závitů opět stoupne a u deseti závitů opět klesne na minimum -29,388 dB. Více hodnot nalezneme v tabulce 2.8.



Obrázek 2.20: Detail toroidního transformátoru

Na obrázku 2.21 pak vidíme vývoj rezonanční frekvence s přidáváním závitů pro stejnou hodnotu kondenzátoru. Hodnota kondenzátoru činila 55,17 pF, která byla nastavena u dvou závitů. Zde vidíme, že frekvence pro jeden závit je vyšší a proto je potřebné nastavit kondenzátor na hodnotu okolo 100 pF, abychom dosáhli rezonanční frekvenci 14 MHz. Pro dva a více závitů se pak změna rezonanční frekvence činí v desetinách. Výsledky změn frekvencí můžeme vidět v tabulce 2.7.

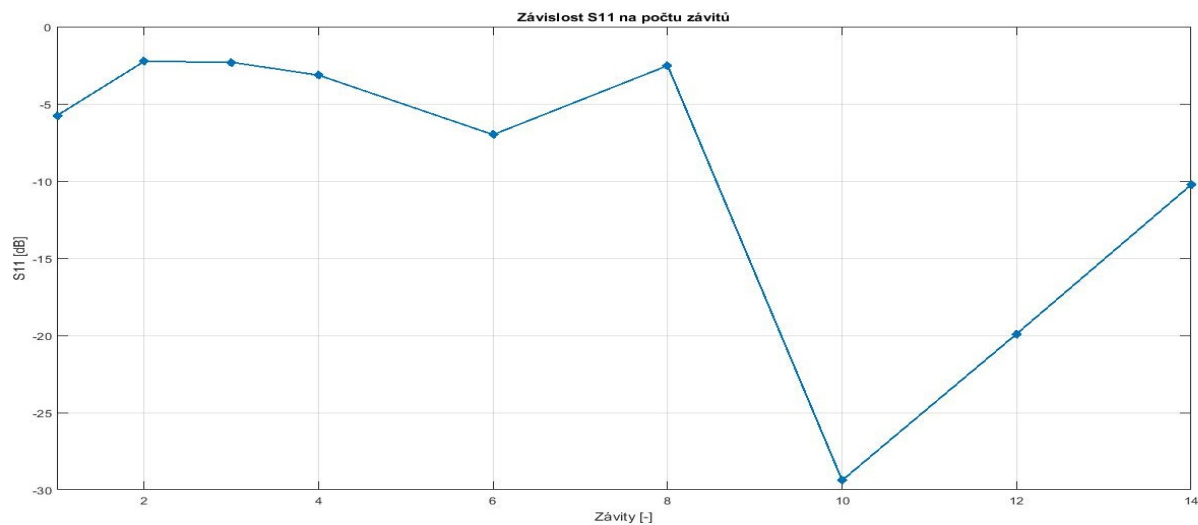


Obrázek 2.21: Graf závislosti rezonanční frekvence na počtu závitů

Se zvyšováním závitů vykazuje anténa lepší výsledky impedančního přizpůsobení. Je patrné, že při více závitech je vazba silnější. Také si můžeme všimnout, že po určitém počtu závitů s určitým minimem hodnoty S11 následuje nárůst hodnoty S11 a poté opět klesá.

Co se týče výběru materiálu toroidu, se zvyšující se permeabilitou při stejné hodnotě kapacity a stejnému počtu závitů se zvyšuje hodnota S11, což znamená, že se zhoršuje impedanční přizpů-

## 2. SOFTWAREVÁ ANALÝZA BUDÍCÍCH OBVODŮ



Obrázek 2.22: Graf závislosti S11 na počtu závitů

Tabulka 2.7: Hodnoty rezonanční frekvence pro graf 2.21 při stejné hodnotě ladícího kondenzátoru

l [cm]	f [MHz]
1	18,52
2	13,972
3	14,388
4	14,488
6	14,522
8	14,652
10	14,528
12	14,56
14	14,604

Tabulka 2.8: Minimální hodnoty S11 pro graf 2.22

l [cm]	S11 [dB]
1	-5,761
2	-2,248
3	-2,304
4	-3,143
6	-6,992
8	-2,523
10	-29,388
12	-19,901
14	-10,242

## 2. SOFTWAREVÁ ANALÝZA BUDÍCÍCH OBVODŮ

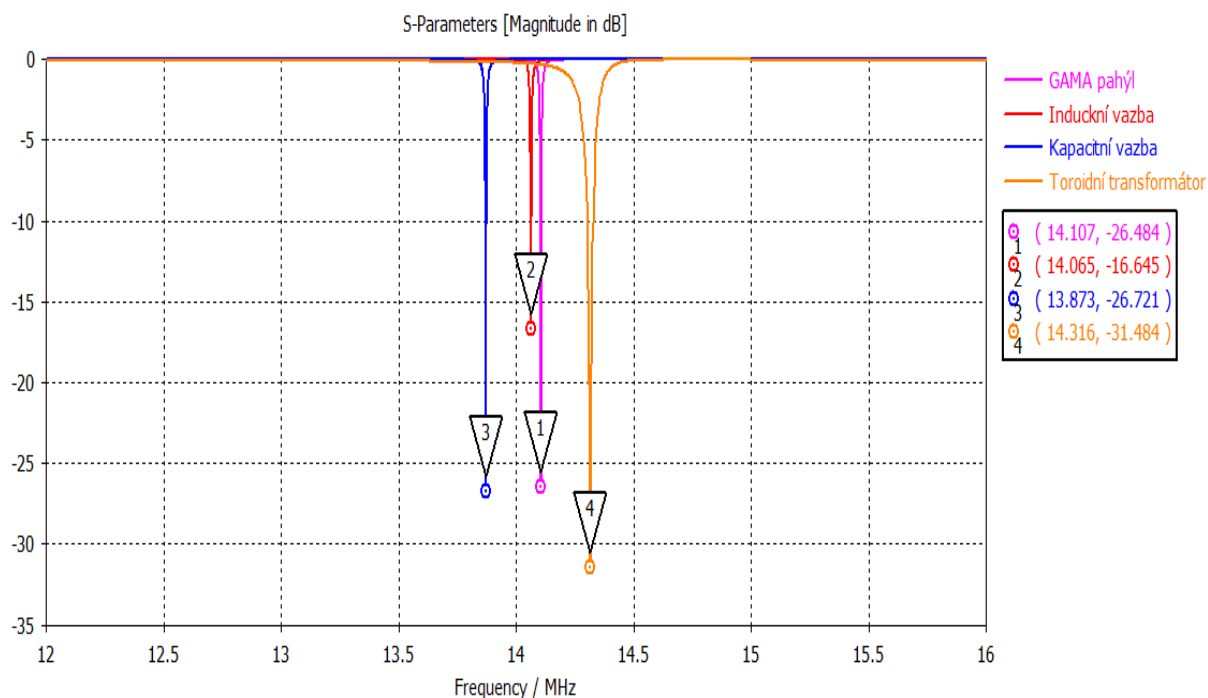
sobení antény. S výše zmíněnou permeabilitou toroidního transformátoru byla anténa odladěna na -29,62 dB, přičemž vyzařovací účinnost činila -9,23 dB. Při permeabilitě  $15000 \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$  se zvýšila vyzařovací účinnost na -8,02 dB, kdežto koeficient odrazu činil -18,802 dB.

### 2.2.5 Analýza a simulace vlivu polarizace magnetické smyčkové antény

Dosud byly všechny modely simulovány ve volném prostředí. Takovouto situaci však v praxi nenajdeme, proto přidáme vodivou rovinu. S tím pak přichází na řadu polarizace antény, která v tomto případě může být vertikální či horizontální.

Dle výsledků simulací je jasné, že horizontální orientace antény není příliš vhodná. MLA vykazuje lepší výsledky impedančního přizpůsobení při vertikální polarizaci. To může být dáno faktem, že u vertikálně vymodelované MLA je dominantní magnetická složka elektromagnetického pole, jenž je rovnoběžná se zemí[11].

Co se týče výsledků ve vertikální rovině, tak oproti výsledkům ve volném prostoru zaznamenáme určité změny, jejichž srovnání je zobrazeno na obrázku 2.23. U indukční vazby vidíme zhoršení parametru S11, což může být dáno přidáním vodivé plochy, jenž má vliv na vzájemnou vazbu mezi vazební smyčkou a hlavní smyčkou. I u kapacitní vazby pozorujeme zvýšení hodnoty parametru S11. U GAMA pahýlu nastává zhoršení. U toroidního transformátoru můžeme výsledek je téměř nezměněn a v tomto ohledu lze říct, že vazba je stabilní.



Obrázek 2.23: Graf frekvenční závislosti S11 pro vybrané budící obvody- vertikální polarizace

## 2. SOFTWAREOVÁ ANALÝZA BUDÍCÍCH OBVODŮ

---

V tabulce 2.9 můžeme vidět výsledky pro horizontální polarizaci pro všechny budící obvody, kde nejlépe vyšla vazba s toroidním transformátorem. Výsledky jsou uvedeny v tabulce, neboť vyjma právě toroidního transformátoru se výsledky při horizontální polarizaci od sebe příliš neliší.

Tabulka 2.9: Srovnání minimálních hodnot  $S_{11}$  jednotlivých budících obvodů pro horizontální polarizaci

Typ budícího obvodu	Hodnota parametru $S_{11}$ [dB]
Indukční vazba	-1,411
Kapacitní vazba	-0,5931
Toroidní transformátor	-22,9202
<i>GAMA</i> pahýl	-1,2331



### 3 Detailní rozbor výsledků simulací budících obvodů

Tato část práce je zasvěcena rozboru výsledků simulací provedených v simulačním prostředí CST Studio. Srovnává především takové výstupy jako je S11, vyzařovací charakteristika, zisk a blízká pole magnetické smyčkové antény při vertikální polarizaci. Na konci kapitoly ještě porovnává některé modely MLA s reálnými anténami.

#### 3.1 Porovnání budících obvodů z hlediska impedančního přizpůsobení

Všechny výsledky simulací byly simulovány dva metry nad zemí(vodivou rovinou) a všechny antény mají vertikální polarizaci, ve které byly vykazovány nejlepší výsledky. V této kapitole jsou porovnávány budící obvody s indukční vazbou v obou variantách(stíněná a nestíněná), s kapacitní vazbou, s toroidním jádrem a s *GAMA* pahýlem. Tato podkapitola analyzuje zejména S11.

Při porovnání obtížnosti ladění je možné říct, že nejsnáze se ladí MLA s kapacitní vazbou, kde komponentami je pouhé zapojení kondenzátorů a nastavení správné hodnoty kapacity. U MLA s toroidem pak záleží na nastavení ladícího kondenzátoru a pak poměru závitů primárního a sekundárního vinutí. Co se týče indukční vazby a budícího obvodu s *GAMA* pahýlem, jejich složitost je přibližně stejná. U obou se setkáváme s více parametry jednotlivých komponent, jenž mají společný vliv na charakteristiku antény. Zatímco u indukční vazby se jedná zejména o umístění, natočení či velikosti vazební smyčky, u *GAMA* pahýlu se pak jedná o vzdálenost mezi připojením živého vodiče a stínění, délce pahýlu a také jeho průměru. Záleží také na tvaru pahýlu.

Tabulka 3.1: Hodnoty S11 a vyzařovací účinnosti pro různé budící obvody

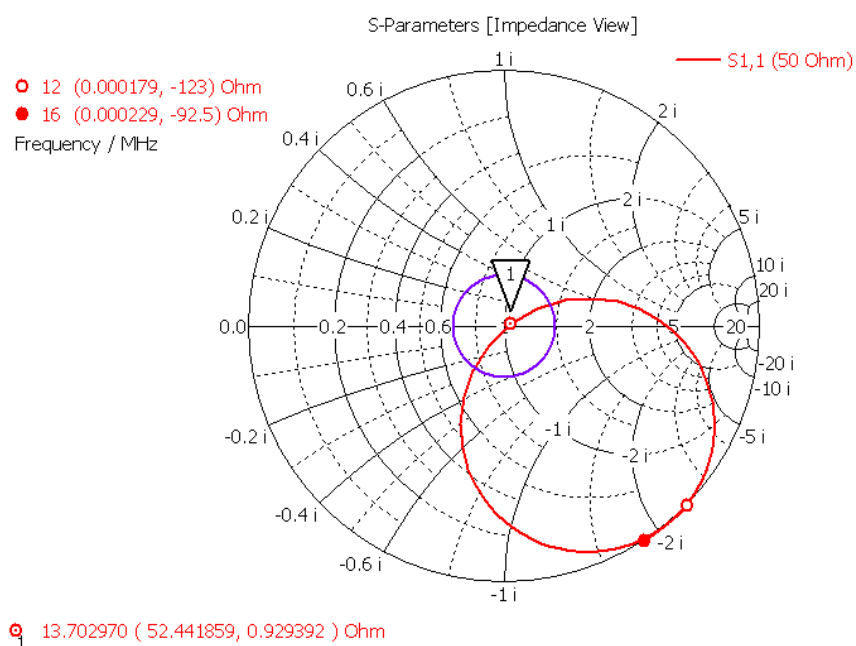
Druh budícího obvodu	S11[dB]	Vyzařovací účinnost[dB]
Indukční vazba - nestíněná	-16,94	-0,0054
Indukční vazba - stíněná	-10,93	-0,755
Kapacitní vazba	-26,72	-0,0031
Toroidní transformátor	-29,62	-9,178
<i>GAMA</i> pahýl	-26,48	-0,0042

V tabulce 3.1 můžeme vidět pro srovnání hodnoty simulovaných budících obvodů. Tabulka ukazuje hodnoty S11 a vyzařovací účinnosti. Hodnoty PSV po přepočtu hodnot S11 dle vzorce 3.1 u všech typů budících obvodů se nachází pod hodnotou 2, což odpovídá dobrému impedančnímu přizpůsobení antén.

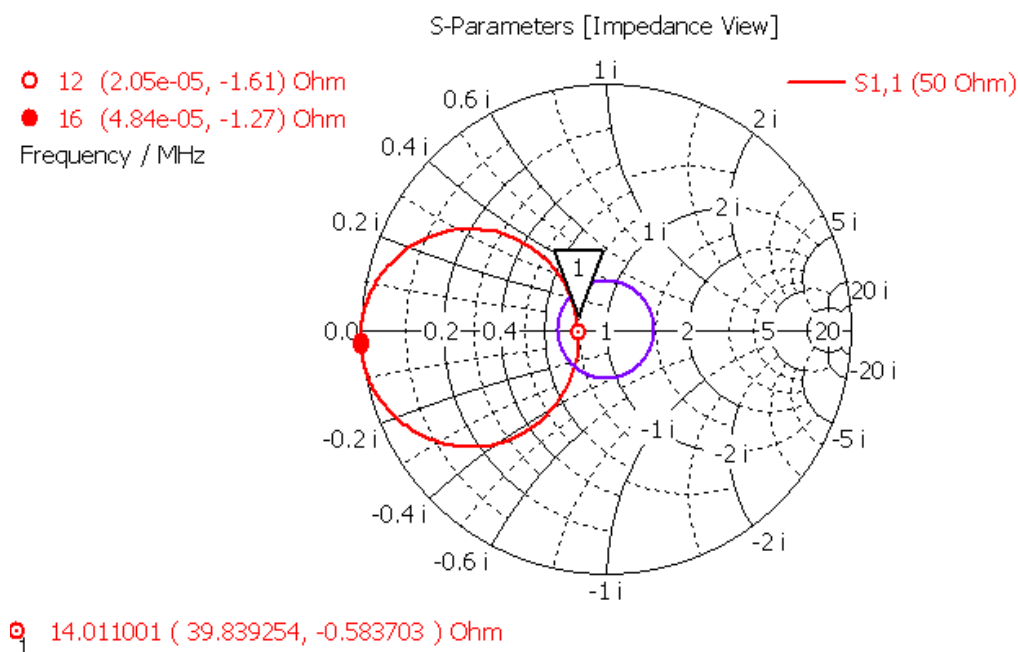
$$PSV = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} [11] \quad (3.1)$$

### 3. DETAILNÍ ROZBOR VÝSLEDKŮ SIMULACÍ BUDÍCÍCH OBVODŮ

Na obrázcích 3.1-3.3 jsou zobrazeny průběhy impedance ve Smithově diagramu vyjádřené v kapitole 2.2.2 v hodnotách  $S_{11}$ . Ačkoliv všechna zapojení dosáhla hodnoty PSV menší než 1,5, u první verze na obrázku 3.1 bylo dosaženo nejlepšího impedance přizpůsobení a proto bylo vybráno toto zapojení k další analýze.

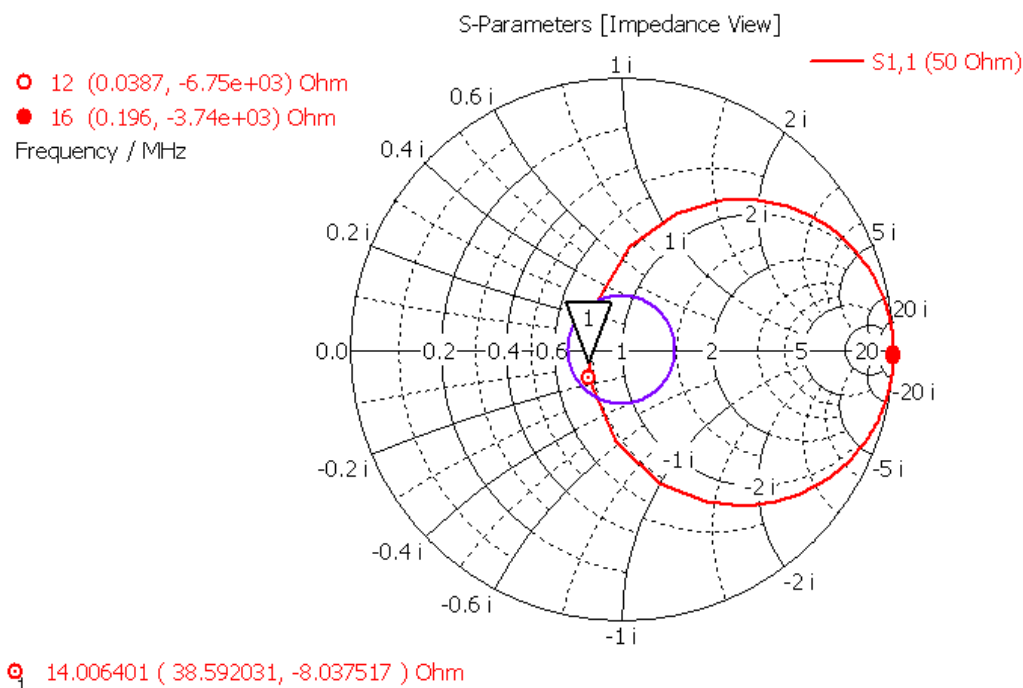


Obrázek 3.1: Smithův diagram průběhu impedance pro MLA s kapacitní vazbou - I.



Obrázek 3.2: Smithův diagram průběhu impedance pro MLA s kapacitní vazbou - II.

### 3. DETAILNÍ ROZBOR VÝSLEDKŮ SIMULACÍ BUDÍCÍCH OBVODŮ



Obrázek 3.3: Smithův diagram průběhu impedance pro MLA s kapacitní vazbou - III.

Jednomu z nejlepších přizpůsobení bylo dosaženo právě u kapacitní vazby, kde hodnota PSV činí 1,096:1. To koresponduje s hodnotou S11, která odpovídá -26,72 dB. Vyzařovací účinnost je poměr mezi výkonem vyzařeným a výkonem dodaným na vstup antény, přičemž ve skutečnosti dochází ke ztrátám[12]. Vyzařovací účinnost při použití kapacitní vazby činí -0,0031 dB, což poukazuje na nízké ztráty.

GAMA pahýl rovněž vykazuje dobré impedance přizpůsobení(hodnota PSV činí 1,118:1). Vyzařovací účinnost s hodnotou -0,0042 dB odpovídá nízkým ztrátám. Narozdíl od indukčních vazeb a toroidního transformátoru je kapacitní vazba a GAMA pahýl pevnou součástí MLA a proto lze očekávat, že bude mít vyzařovací účinnost lepší.

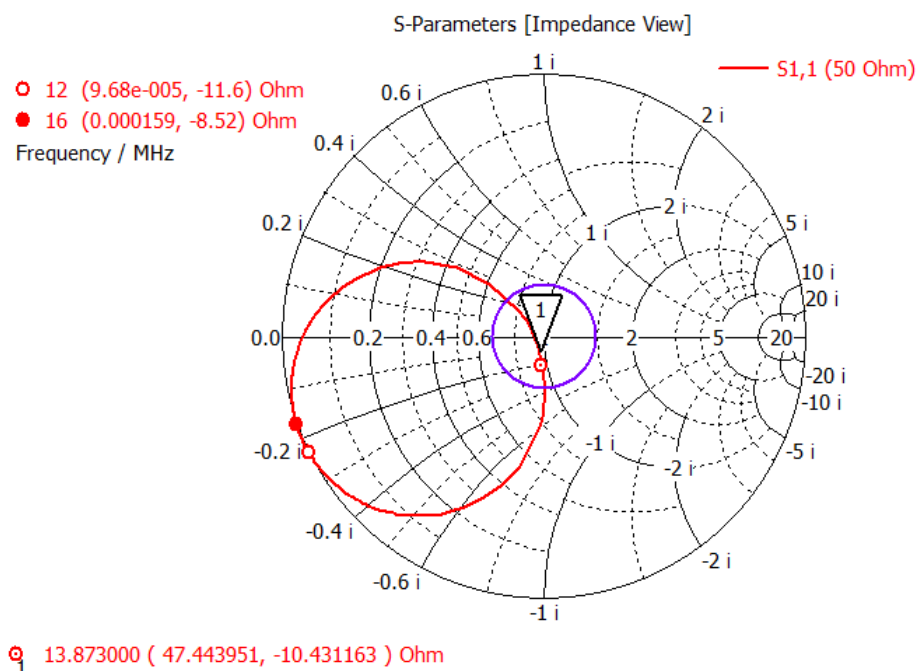
Indukční vazba má oproti výše zmíněným budícím obvodům vyšší hodnotu S11, nicméně stále lze antény s indukční vazbou obou typů považovat za dobře impedance přizpůsobené. Rozdíl mezi stíněnou a nestíněnou verzí lze najít ve vyzařovací charakteristice, kde stíněná verze má vyšší ztráty(hodnota -0,755 dB).

Ačkoliv má toroidní transformátor velmi dobré impedance přizpůsobení(hodnota PSV 1,068:1) a činitel odrazu tomu odpovídá(hodnota -29,62 dB), vyzařovací účinnost je oproti ostatním modelům velmi nízká(hodnota -9,178 dB). To je způsobeno materiálem toroidního prstence.

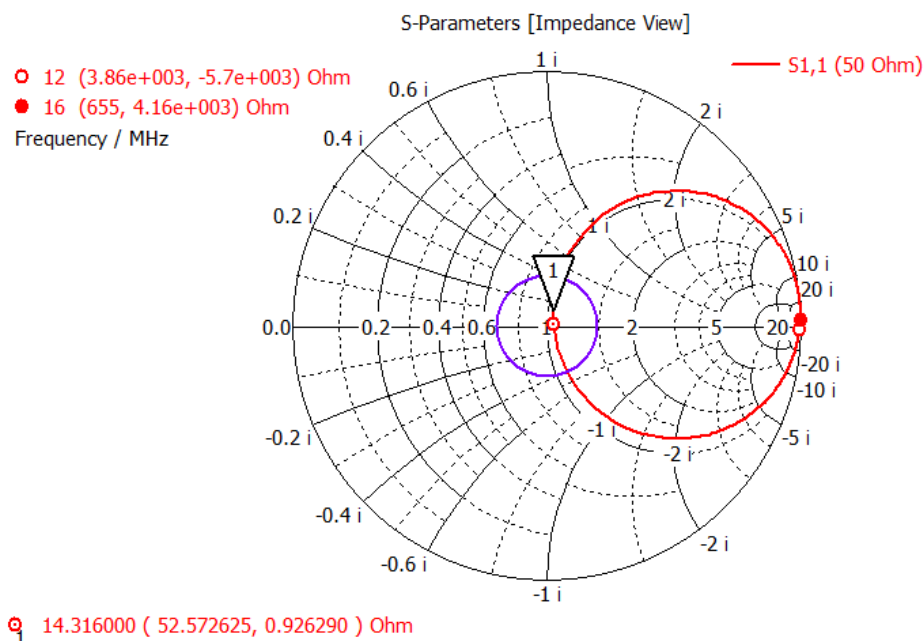
Na obrázcích 3.4 - 3.8 je průběh impedance ve Smithově diagramu vycházející z S11 pro všechny budící obvody. Lze si povšimnout, že GAMA pahýl a indukční stíněná vazba mají kapacitní charakter impedance. Ostatní typy budících obvodů mají induktivní charakter impedance. Referenční kruh PSV na obrázcích odpovídá hodnotě 1,5.



### 3. DETAILNÍ ROZBOR VÝSLEDKŮ SIMULACÍ BUDÍCÍCH OBVODŮ

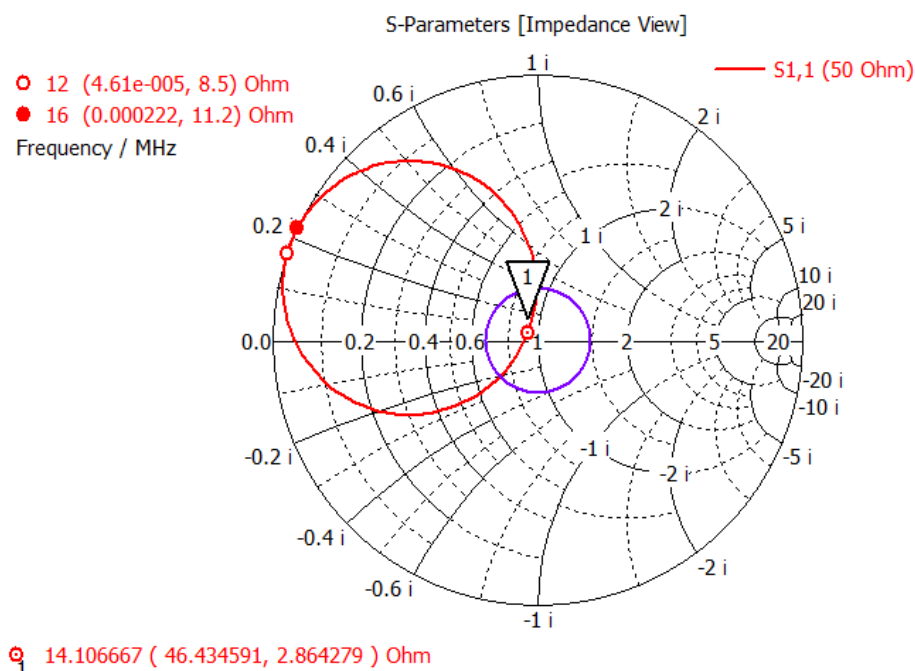


Obrázek 3.6: Smithův diagram průběhu impedance pro MLA s kapacitní vazbou (ve výšce 2 metry nad zemí)



Obrázek 3.7: Smithův diagram průběhu impedance pro MLA s toroidním transformátorem (ve výšce 2 metry nad zemí)

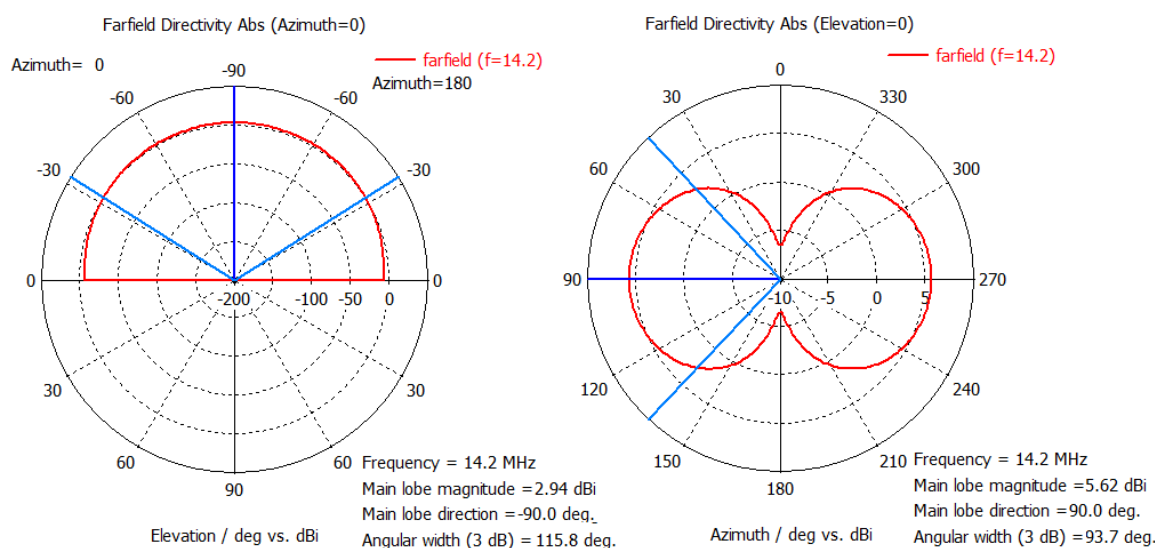
### 3. DETAILNÍ ROZBOR VÝSLEDKŮ SIMULACÍ BUDÍCÍCH OBVODŮ



Obrázek 3.8: Smithův diagram průběhu impedance pro MLA s *GAMA* pahýlem (ve výšce 2 metry nad zemí)

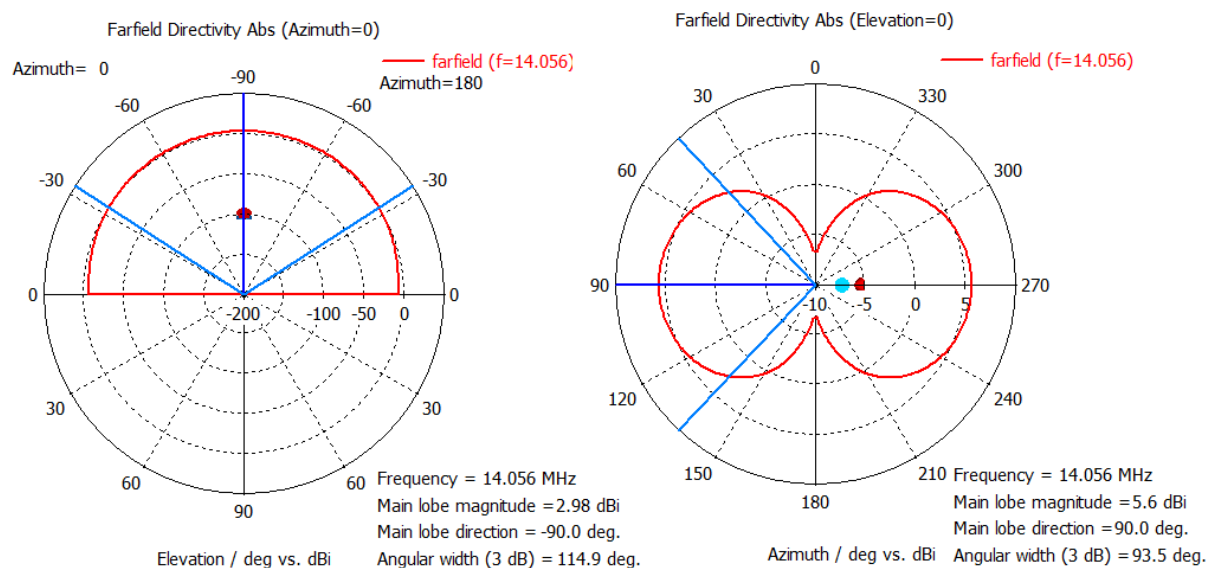
### 3.2 Analýza zisku a směrovosti budících obvodů

Hodnoty zisku souvisí s vyzařovací účinností. Na obrázcích 3.9 - 3.13 můžeme vidět grafy směrovosti a vyjádření zisku. Magnetická smyčková anténa má všesměrovou charakteristiku, kde na obrázcích je vyobrazena nad vodivou zemí.

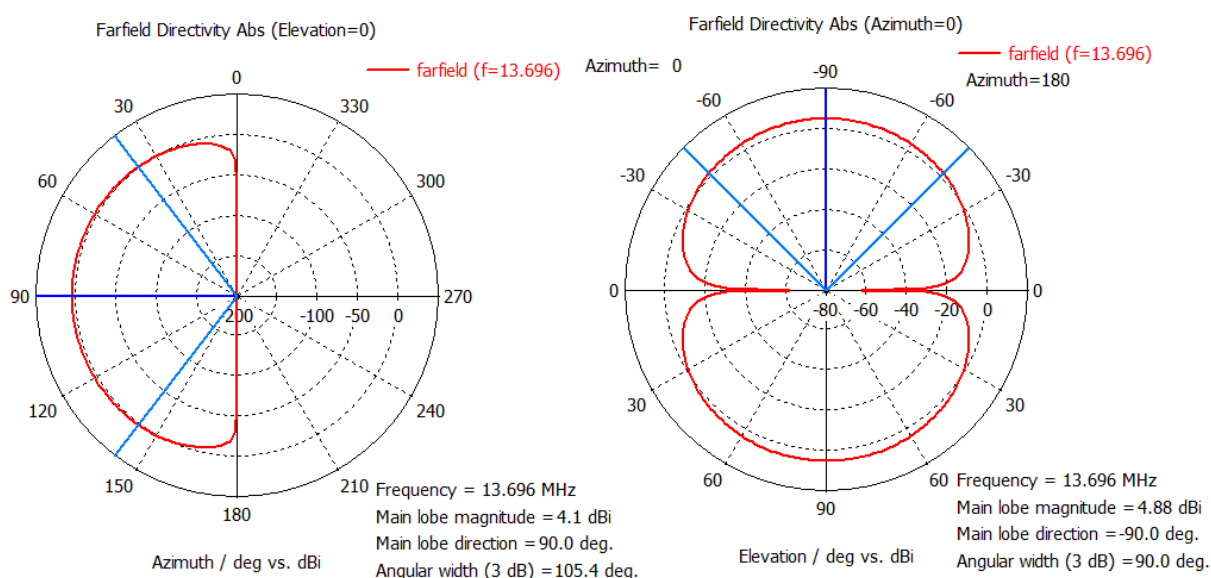


Obrázek 3.9: Směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí pro nestíněnou indukční vazbu - vlevo horizontální pohled, vpravo vertikální pohled

### 3. DETAILNÍ ROZBOR VÝSLEDKŮ SIMULACÍ BUDÍCÍCH OBVODŮ



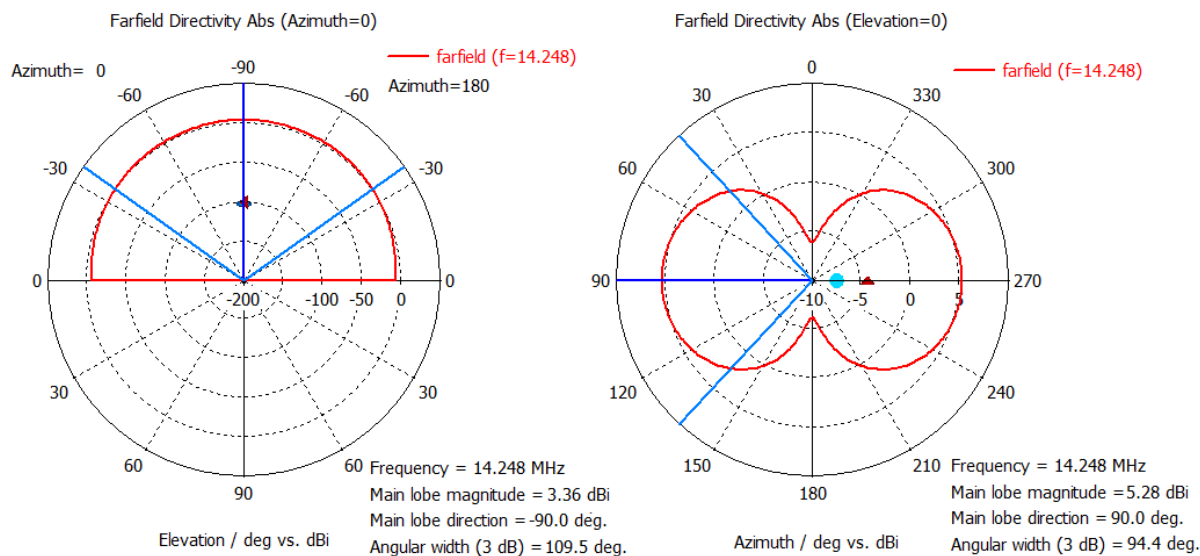
Obrázek 3.10: Směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí pro stíněnou indukční vazbu - vlevo horizontální pohled, vpravo vertikální pohled



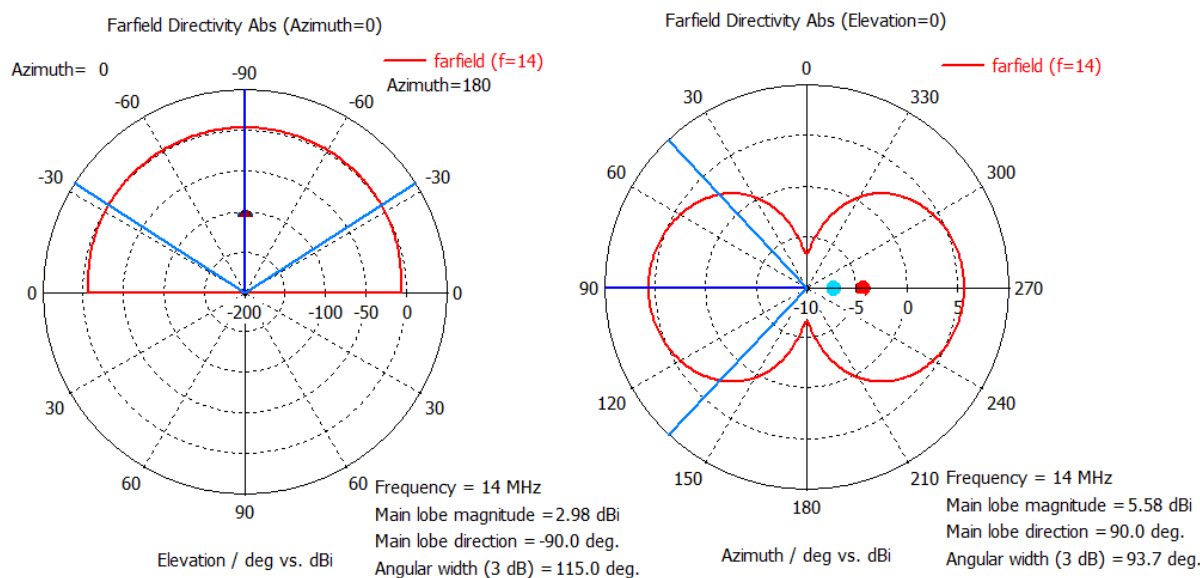
Obrázek 3.11: Směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí pro kapacitní vazbu - vlevo horizontální pohled, vpravo vertikální pohled

Nejvyšší hodnoty zisku nabývá nestíněná indukční vazba s hodnotou 5,62 dBi (obrázek 3.9). Magnetická smyčková anténa s *GAMA* pahýlem nabývá hodnoty zisku 5,58 dBi (obrázek 3.13). Zisk stíněné indukční vazby činí hodnoty zisku 5,6 dBi (viz. obrázek 3.11). Co se týče zisku MLA s toroidním transformátorem, její zisk činí 5,28 dBi (obrázek 3.12). Jak již bylo zmíněno

### 3. DETAILNÍ ROZBOR VÝSLEDKŮ SIMULACÍ BUDÍCÍCH OBVODŮ



Obrázek 3.12: Směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí pro MLA s toroidem - vlevo horizontální pohled, vpravo vertikální pohled

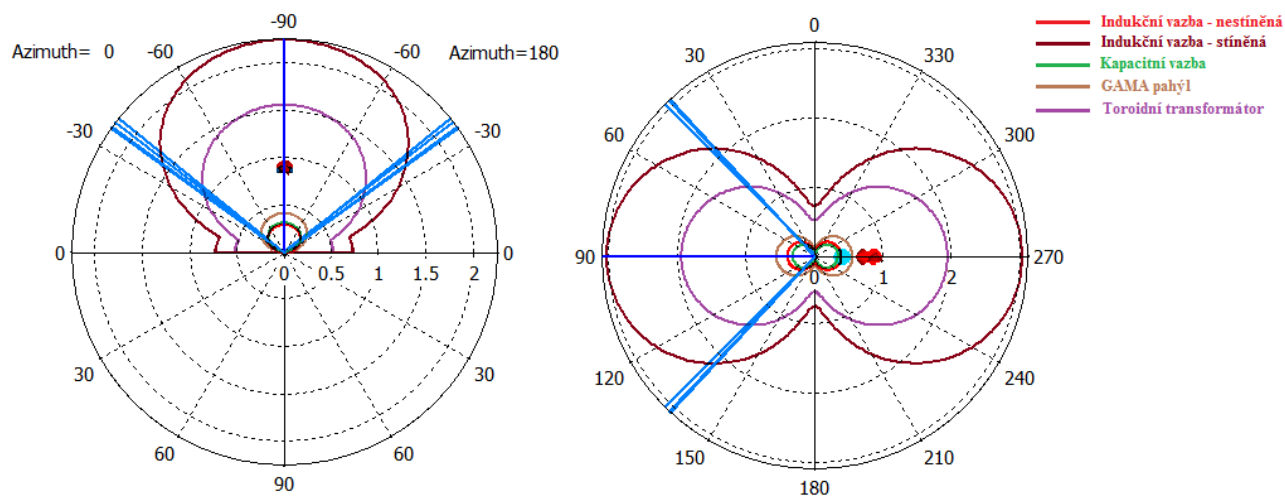


Obrázek 3.13: Směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí pro GAMA pahýl - vlevo horizontální pohled, vpravo vertikální pohled

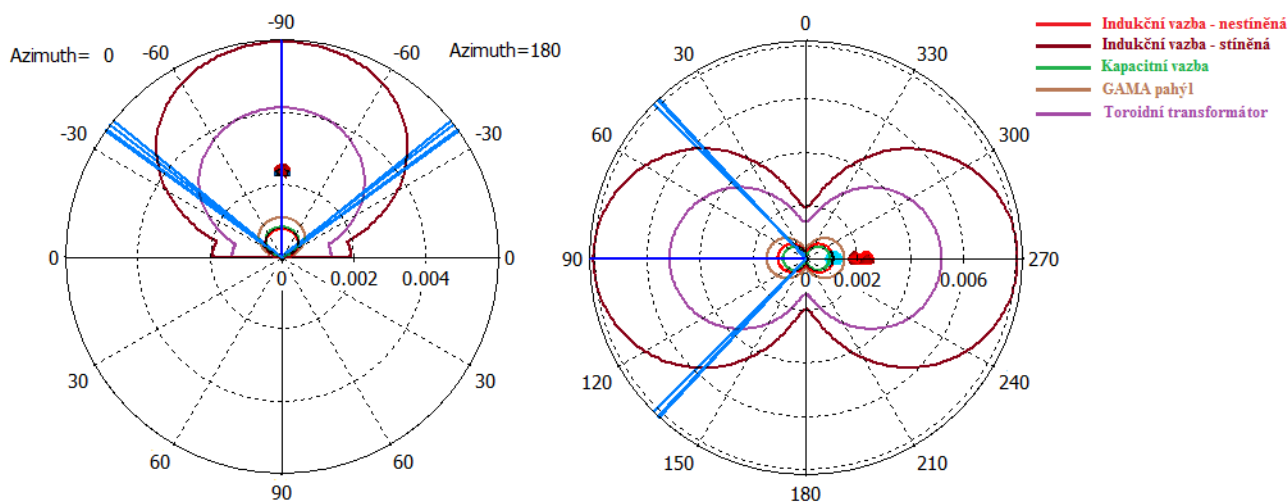
výše, samotný materiál způsobuje ztráty, které se odrazí i na hodnotě zisku. Nejnižší ze simulací při ohledu na zisk vyšla MLA s kapacitní vazbou a s hodnotou 4,88 dBi (obrázek 3.10). Pro srovnání je možné nahlédnout na obrázek 3.14, kde můžeme vidět elektrickou složku vzdáleného pole. To samé platí i pro obrázek 3.15, kde je vyobrazena magnetická složka vzdáleného pole.



### 3. DETAILNÍ ROZBOR VÝSLEDKŮ SIMULACÍ BUDÍCÍCH OBVODŮ



Obrázek 3.14: Graf vzdáleného pole elektrické složky - vlevo horizontální pohled, vpravo vertikální pohled



Obrázek 3.15: Graf vzdáleného pole magnetické složky - vlevo horizontální pohled, vpravo vertikální pohled

### 3.3 Porovnání budících obvodů z hlediska blízkého pole

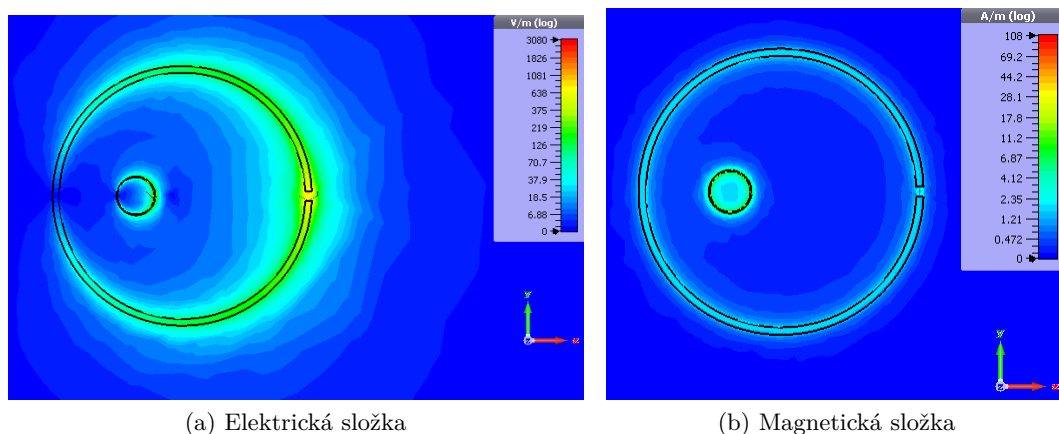
Tabulka 3.2 uvádí hodnoty elektrické a magnetické složky blízkého pole s různými budícími obvody. Nejvyšší hodnotu magnetické složky má MLA se stíněnou indukční vazbou 8,02 mA/m, ale stejně tak má nejvyšší hodnotu elektrické složky 3,02 V/m. Nejnižší hodnotu elektrické a magnetické složky má naopak MLA s kapacitní vazbou, kde hodnota elektrické složky činí 0,331 V/m. Hodnota magnetické složky je 0,879 mA/m.

### 3. DETAILNÍ ROZBOR VÝSLEDKŮ SIMULACÍ BUDÍCÍCH OBVODŮ

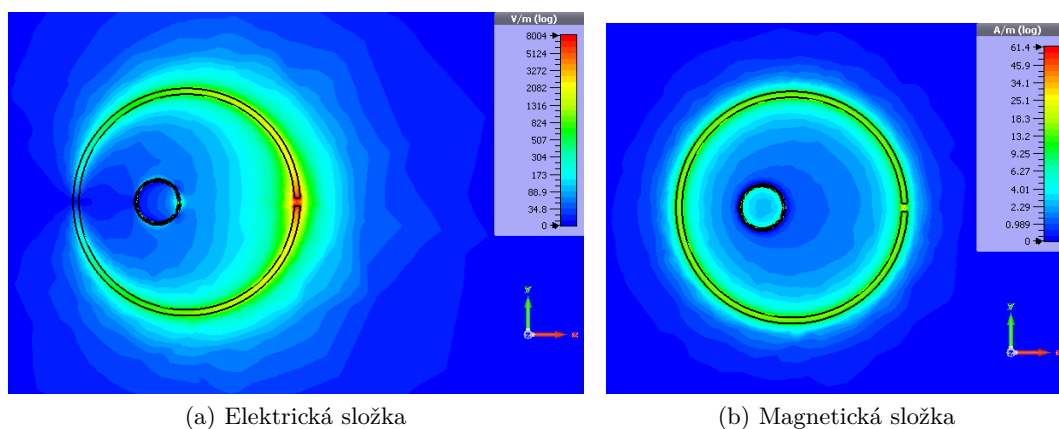
Tabulka 3.2: Hodnoty elektrické a magnetické složky blízkého pole pro typy budících obvodů ve vzdálenosti 1 metru

Druh budícího obvodu	$E[V/m]$	$H[mA/m]$
Indukční vazba - nestíněná	0,393	1,04
Indukční vazba - stíněná	3,02	8,02
Kapacitní vazba	0,331	0,879
Toroidní transformátor	1,93	5,13
<i>GAMA</i> pahýl	0,553	1,47

Na obrázcích 3.16 - 3.20 je rozložení elektrické složky i magnetické složky blízkého pole promítnuté v rovině smyčky. Z obrázků můžeme vidět, že elektrická složka je největší v místě kondenzátoru, kdežto magnetická složka obklopuje celou hlavní smyčku.

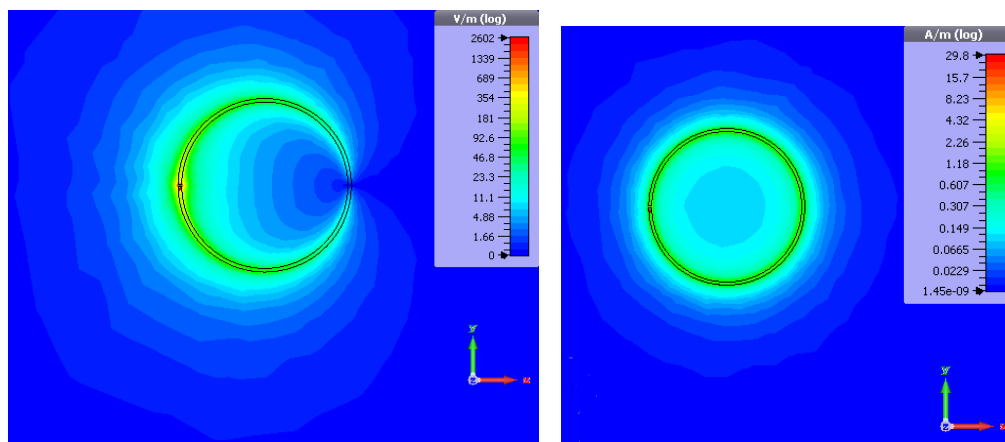


Obrázek 3.16: Blízké pole pro MLA s nestíněnou indukční vazbou



Obrázek 3.17: Blízké pole pro MLA s stíněnou indukční vazbou

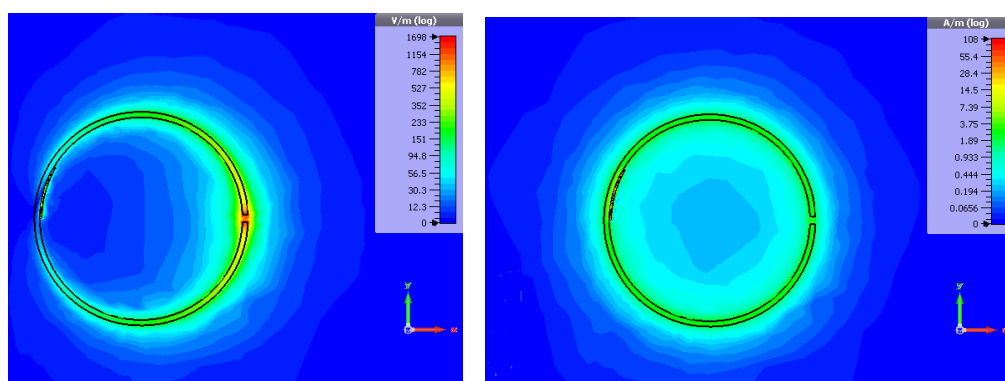
### 3. DETAILNÍ ROZBOR VÝSLEDKŮ SIMULACÍ BUDÍCÍCH OBVODŮ



(a) Elektrická složka

(b) Magnetická složka

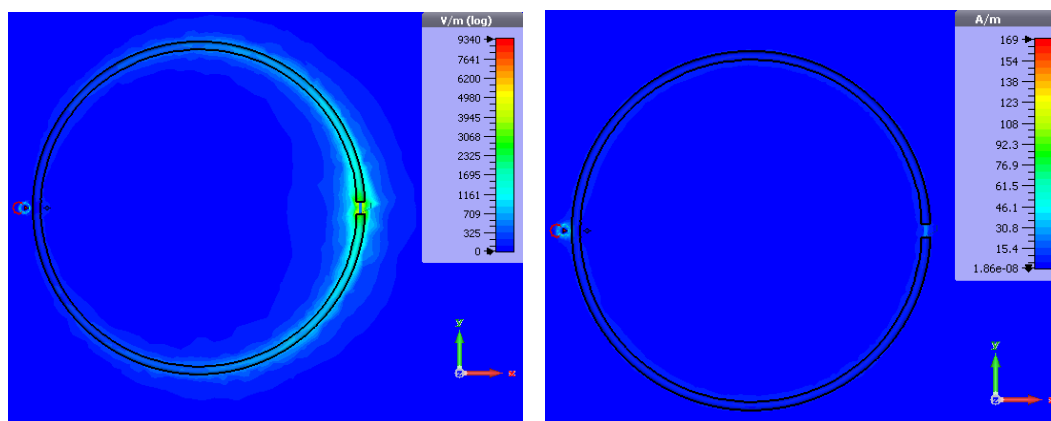
Obrázek 3.18: Blízké pole pro MLA s kapacitní vazbou



(a) Elektrická složka

(b) Magnetická složka

Obrázek 3.19: Blízké pole pro MLA s *GAMA* pahýlem



(a) Elektrická složka

(b) Magnetická složka

Obrázek 3.20: Blízké pole pro MLA s toroidním transformátorem

### 3. DETAILNÍ ROZBOR VÝSLEDKŮ SIMULACÍ BUDÍCÍCH OBVODŮ

V tabulce 3.3 můžeme spatřit hodnoty ze sond umístěných osm metrů v ose X od MLA. Z výsledků je patrné, že varianta stíněné indukční vazby má nižší hodnoty elektrické a magnetické složky elektromagnetického pole oproti nestíněné variantě. Varianta s *GAMA* pahýlem je svými hodnotami srovnatelná s nestíněnou indukční vazbou. U toroidního transformátoru můžeme pozorovat nejnižší hodnoty obou složek.

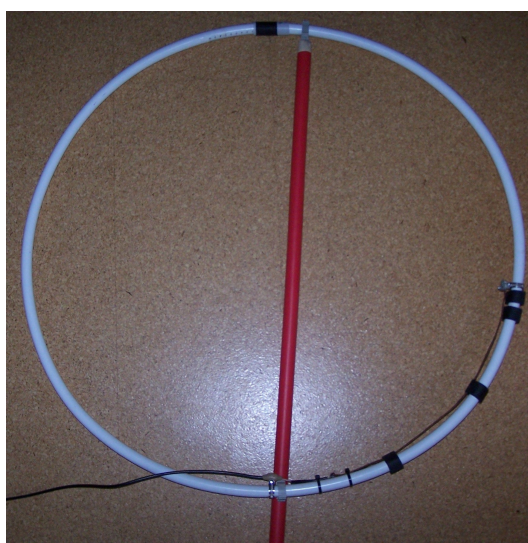
Tabulka 3.3: Hodnoty elektrické a magnetické složky ze sondy pro různé budící obvody

Druh budícího obvodu	E[V/m]	H[mA/m]
Indukční vazba - nestíněná	1,186	2,933
Indukční vazba - stíněná	1,138	2,815
Kapacitní vazba	0,977	2,434
<i>GAMA</i> pahýl	1,197	2,963
Toroidní transformátor	0,502	1,222

#### 3.4 Ověření správnosti modelů s reálnými magnetickými smyčkovými anténami

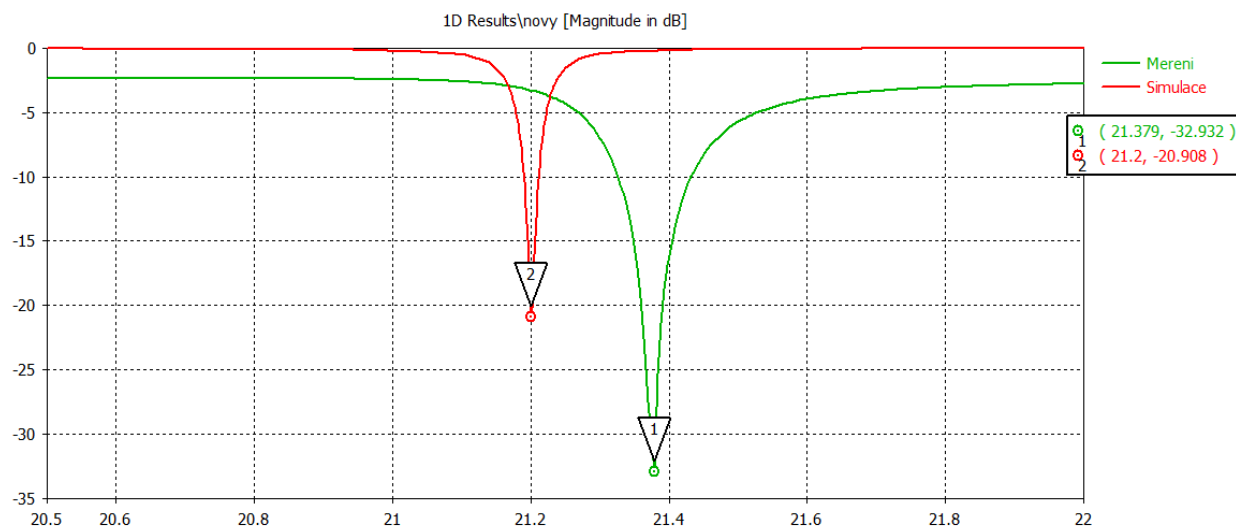
Tato podkapitola srovnává výsledky simulací a kontrolních měření, přičemž zde si klade práce primárně za cíl zjistit, na kolik odpovídají simulace skutečnosti. Je třeba poznamenat, že měření byla provedena na anténách odlišných od výše simulovaných.

Pro ověření bylo provedeno měření na MLA-M, což je multipásmová magnetická smyčková anténa s kapacitní vazbou s naladěnou rezonanční frekvencí na 14 MHz. Dále byla použita MLA s indukční vazbou s rezonanční frekvencí 145 MHz a poslední byla anténa s *GAMA* pahýlem s rezonanční frekvencí 21 MHz.



Obrázek 3.21: MLA s *GAMA* pahýlem s rezonanční frekvencí 21 MHz

### 3. DETAILNÍ ROZBOR VÝSLEDKŮ SIMULACÍ BUDÍCÍCH OBVODŮ



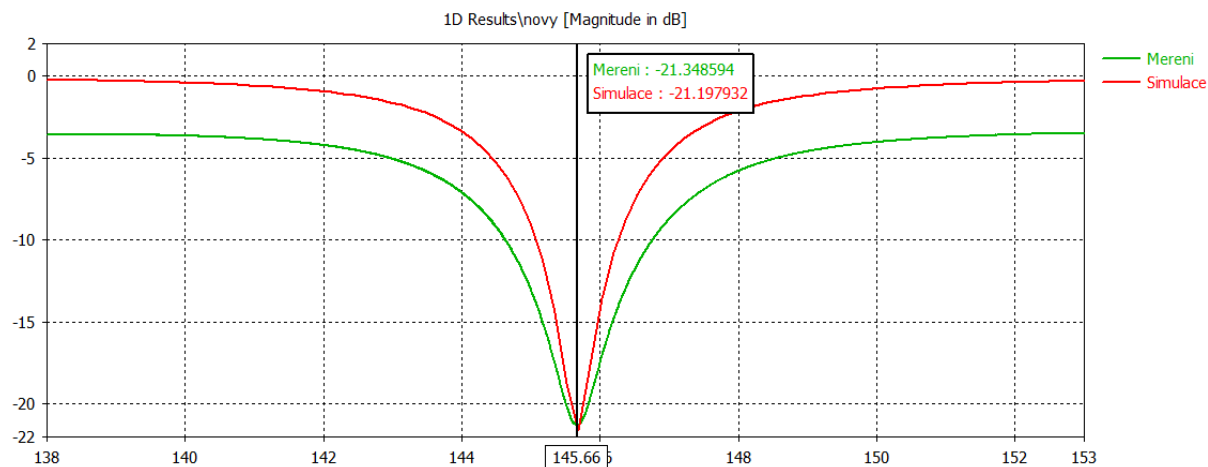
Obrázek 3.22: Graf frekvenční závilosti S11 pro MLA s *GAMA* pahýlem - srovnání

Na obrázku 3.22 můžeme nalézt naměřené a odsimulované výsledky S11 na anténě s *GAMA* pahýlem. Při měření bylo dosaženo hodnoty -32,932 dB, zatímco při simulaci byl získán výsledek -20,908 dB. Nesrovnalosti mezi výsledkem měření a výsledkem simulací může spočívat v tom, že model antény s *GAMA* pahýlem byl zjednodušen pro prostředí CST Studio.



Obrázek 3.23: MLA s indukční vazbou s rezonanční frekvencí 145 MHz

### 3. DETAILNÍ ROZBOR VÝSLEDKŮ SIMULACÍ BUDÍCÍCH OBVODŮ



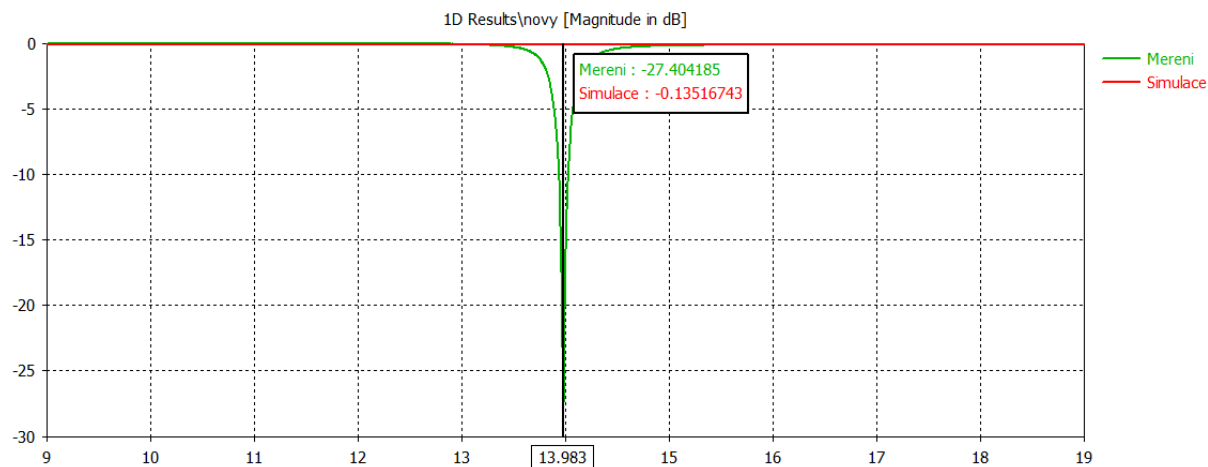
Obrázek 3.24: Graf frekvenční závilosti S11 pro MLA s indukční vazbou - srovnání

Na obrázku 3.24 můžeme vidět naměřené a odsimulované výsledky S11 na anténě s nestíněnou indukční vazbou. Při měření bylo dosaženo hodnoty -21,348 dB, zatímco při simulaci byl získán výsledek -21,197 dB. Výsledek simulace odpovídá skutečnosti. Chyba měření byla způsobena nejspíše parazitními kapacitami tvořené plexisklovým držákem nebo také nepřesným tvarem vazební smyčky na skutečném modelu.



Obrázek 3.25: MLA-M naladěná na rezonanční frekvenci 14 MHz

### 3. DETAILNÍ ROZBOR VÝSLEDKŮ SIMULACÍ BUDÍCÍCH OBVODŮ



Obrázek 3.26: Graf frekvenční závilosti S11 pro MLA s kapacitní vazbou - srovnání

Na obrázku 3.26 můžeme nalézt naměřené a osimulované výsledky S11 na anténě s kapacitní vazbou. Při měření bylo dosaženo hodnoty -27,404 dB, zatímco při simulaci byl získán výsledek -0,1351 dB. Zde lze vidět, že výsledky neodpovídají skutečnosti, ačkoliv se u simulace podařilo naladit anténu na 14 MHz.

Ačkoliv se výsledky simulací ne vždy shodují s naměřenými hodnotami, lze přesto tvrdit, že výsledky jsou věrohodné a s určitými nedostatky popisují skutečnost. Vždy je třeba mít na paměti, že simulace je pouze odhad skutečnosti.

#### 3.5 Zhodnocení dosažených výsledků

Magnetická smyčková anténa s indukční vazbou je soustava dvou smyček, hlavní a vazební, jejíž vlastnosti spočívají ve jejich vzájemném nastavení. Vzhledem k tomu, že se jedná v podstatě o dvě volné části, jejich upevnění může být trochu složitější a bude vyžadovat nějakou dodatečnou nevodivou konstrukci pro jejich upevnění. To může být problémem i při ladění. Přesto však při správném nastavení má nestíněná varianta nejvyšší zisk oproti ostatním budícím obvodům. Stíněná varianta má sice nižší zisk, ale její předností je snížení vlivu elektrické složky elektromagnetického pole. Konstrukce vazební smyčky může být realizována jednoduše pomocí vodiče či samotného koaxiálního kabelu v případě stíněné varianty, což lze považovat za výhodu díky své jednoduchosti.

Výhoda kapacitní vazby spočívá v jednoduchém naladění. Jde v zásadě pouze o správné nastavení hodnot kapacit kondenzátorů. Díky tomu lze velmi jemně nastavit požadovaný kmitočet a také nalézt nejlepší impedanční přizpůsobení. Zároveň je možné sestavit díky tomu pevnou konstrukci magnetické smyčkové antény. Nevýhodou může být nižší zisk, ačkoliv v některých aplikacích nemusí být vysoký zisk požadován.

Magnetická smyčková anténa s *GAMA* pahýlem má výhodu v pevné konstrukci, neboť pahýl je



### 3. DETAILNÍ ROZBOR VÝSLEDKŮ SIMULACÍ BUDÍCÍCH OBVODŮ

---

fyzicky přímo připojen k hlavní smyčce. Ladění pak může být obtížnější kvůli několika na sobě závislým prvkům. Na druhou stranu má anténa díky *GAMA* pahýlu lepší vyzařovací účinnost a nižší ztráty. Zisk je téměř shodný se ziskem magnetické smyčkové antény s indučkní vazbou. Vyzařovací charakteristika může být mírně ovlivněna asymetrií *GAMA* pahýlu.

Varianta s toroidním transformátorem se svými výsledky vykazuje dobré impedanční přizpůsobení, nicméně ztráty způsobené materiálem toroidu způsobují nízký zisk. To znamená, že v praxi bude nutné zvolit vhodný materiál, který na jedné straně bude umožňovat dobré impedační přizpůsobení, ale na straně druhé pak bude poskytovat dobrý zisk. Zde musíme počítat s tím, že se zvyšující se hodnotou permeability toroidního jádra se zhoršuje impedanční přizpůsobení antény, nicméně efektivita antény má vyšší hodnoty. A zatímco u ostatních antén se při horizontální polarizaci antény razantně zhorší hodnota impedančního přizpůsobení, u vazby s toroidním transformátorem tomu tak není.



## 4 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo přinést bližší pohled do problematiky budících obvodů u magnetické smyčkové antény. V teoretické části, která je popsána v první kapitole, jsem postupně popsal základní vlastnosti magnetické smyčkové antény a uvedl základní skupiny budících obvodů včetně jejich vlastností a funkce.

Jádro práce pak spočívalo v praktické části v kapitolách 2 a 3, kde jsem postupně vytvářel modely magnetické smyčkové antény pro rezonanční frekvenci 14 MHz v simulačním prostředí CST Studiu s různými budícími obvody. Následně jsem v simulacích zjišťoval vliv jednotlivých komponent na vlastnosti antény a dále jsem prozkoumával možnosti ladění rezonančního kmitočtu u daných budících obvodů. V poslední kapitole jsem srovnával jednotlivé druhy budících obvodů, jejich vlastnosti a posuzoval jejich pozitiva a negativa. Také bylo provedeno kontrolní měření na reálných modelech magnetické smyčkové antény pro různé kmitočty a cílem bylo zjistit věrohodnost získaných simulací. Hlavním přínosem této práce je vytvoření zcela nové a dosud nepublikované studie budících obvodů, popsání možností ladění jejich pomocí jejich prvků a porovnání jejich vlastností.

Magnetická smyčková anténa má výhodu ve své jednoduchosti výroby a v malých rozměrech. V závislosti na budícím obvodu se pak liší její funkční vlastnosti. Magnetická smyčková anténa s indukční vazbou je jednoduchá na výrobu, neboť k výrobě vazební smyčky lze použít jednoduchý vodič z koaxiálního kabelu, a dle výsledků simulací má poměrně dobré vlastnosti jak z hlediska impedačního přizpůsobení, tak z pohledu ztrátovosti a zisku. Problémem může být vzájemné nastavení obou smyček.

Zde pak lépe vyhoví vazba s *GAMA* pahýlem, která dosahuje podobných vlastností a přitom je její konstrukce pevná a odolá lépe povětrnostním podmínkám. Je možné pokládat za nevýhodu složitější konstrukci, jako například u kruhové MLA vytvarovat tvar pahýlu kopírující hlavní smyčku.

Kapacitní vazba nabízí rovněž pevnou konstrukci a snadné ladění, neboť jedinými ladícími prvky je zapojení kondenzátorů, které je možné umístit do ochranného boxu. Přesto má oproti ostatním obvodům nižší zisk.

Vlastnosti vazby s toroidním transformátorem se odvíjí od zvoleného materiálu toroidu, který sám o sobě způsobuje ztráty, což se odrazí i v hodnotě zisku. Na zvoleném materiálu pak závisí i možnosti impedačního přizpůsobení a vyzařovací efektivity MLA.

Bc. Radek Fajkus

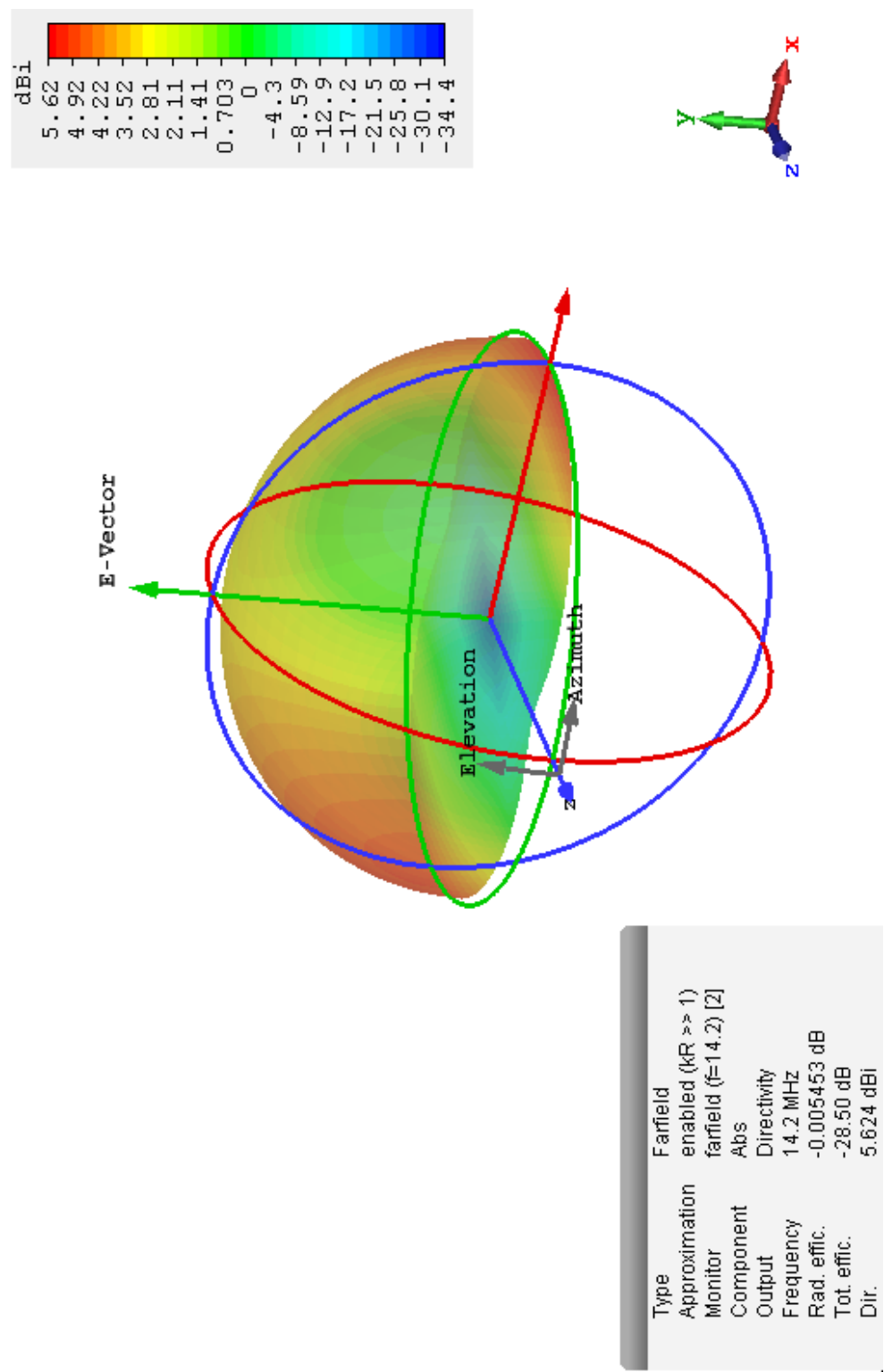
## Literatura

- [1] Burger Oldřich, Dvorský Marek. *Magnetická smyčková anténa: pokaždé trochu jinak*, 1. vyd. Ostrava: EDUCA TV, 2015. ISBN 978-80-260-7485-4.
- [2] Wimo [online]. [cit. 10.4.2018]. Dostupný na WWW: [http://s217877884.websitehome.co.uk/amateur\\_radio/amateur\\_radio\\_antennas/images/1.2m\\_mag\\_loop.jpg](http://s217877884.websitehome.co.uk/amateur_radio/amateur_radio_antennas/images/1.2m_mag_loop.jpg)
- [3] Static Kodajo [online]. [cit. 10.4.2018]. Dostupný na WWW: <http://static.kodajo.com/images/user/fileUp/93523e4029a3d77c44d2e1fbdb06ccb3.png>
- [4] Static Kodajo [online]. [cit. 10.4.2018]. Dostupný na WWW: <http://static.kodajo.com/images/user/fileUp/56513c506f33b60b54dfb0c07f37d452.jpg>
- [5] Svoboda Luděk *ELEKTRONICKY LADĚNÁ SMYČKOVÁ ANTÉNA PRO KMITOČTY DO 30 MHZ* [online]. [cit. 10.4.2018]. Dostupný na WWW: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=9579](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=9579)
- [6] OK1UFC. *Sweb.cz* [online]. [cit. 10.4.2018]. Dostupný na WWW: [http://ok1ufc.sweb.cz/ok1ufc/MLA\\_7MHz.htm](http://ok1ufc.sweb.cz/ok1ufc/MLA_7MHz.htm)
- [7] Yates Steve. *Small Transmitting Loop Antennas* [online]. [cit. 10.4.2018]. Dostupný na WWW: <http://www.aricuneo.it/AREA%20TECNICA/loop-magnetiche/AA5TB%20-%20Small%20Loop%20Antennas.pdf>
- [8] Underhill M. J., Blewett M. J. *MAGNETIC LOOP OR SMALL FOLDED DIPOLE?* [online]. [cit. 10.4.2018]. Dostupný na WWW: <https://pdfs.semanticscholar.org/25f7/847075f40ed75152282857c6ce0b780fc797.pdf>
- [9] Komárek Vojtěch, *Plochá magnetická smyčková anténa, diploma thesis* VŠB-TU Ostrava, Ostrava, 2014 [cit. 10.4.2018].
- [10] Dörenberg F. *nonstopsystems.com* [online]. [cit. 10.4.2018]. Dostupný na WWW: [https://www.nonstopsystems.com/radio/frank\\_radio\\_antenna\\_magloop.htm#intro](https://www.nonstopsystems.com/radio/frank_radio_antenna_magloop.htm#intro)
- [11] Dvorský Marek. *Základy bezdrátových komunikací pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*, 2014 [cit. 10.4.2018].
- [12] Balanis, Constantine A., *Antenna theory, analysis and design, 3rd Edition* New Jersey: John Wiley & Sons, 2005, ISBN 978-0-471-66782-7.

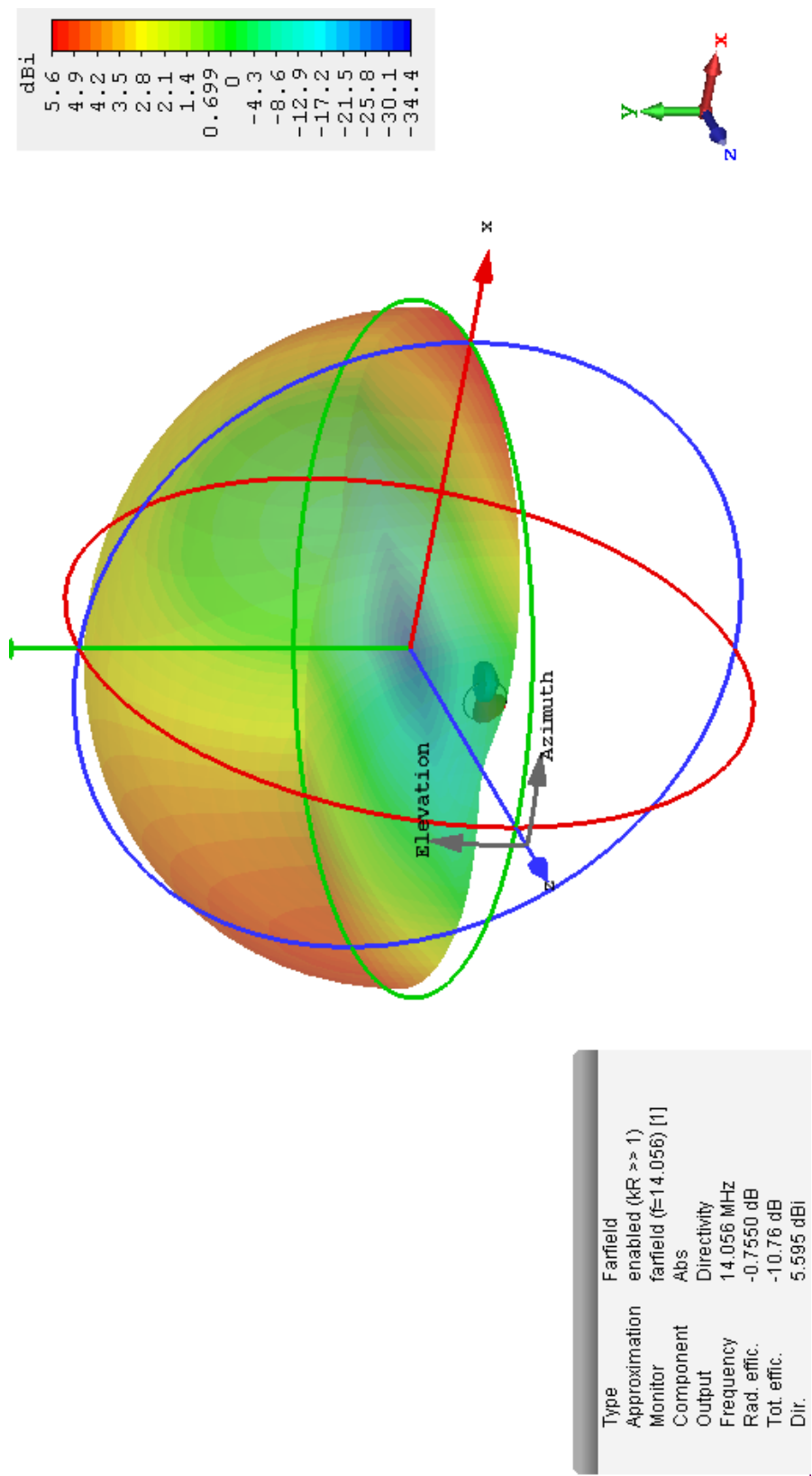
## **A Obsah elektronické přílohy**

- GAMA\_FINAL.cst - Odsimulovaný model MLA s GAMA pahýlem
- IV\_FINAL.cst - Odsimulovaný model MLA s nestíněnou indukční vazbou
- IV-FCC\_FINAL.cst - Odsimulovaný model MLA se stíněnou indukční vazbou
- KV\_FINAL.cst - Odsimulovaný model MLA s kapacitní vazbou
- toroid\_FINAL.cst - Odsimulovaný model MLA s toroidním transformátorem
- cti\_me.txt

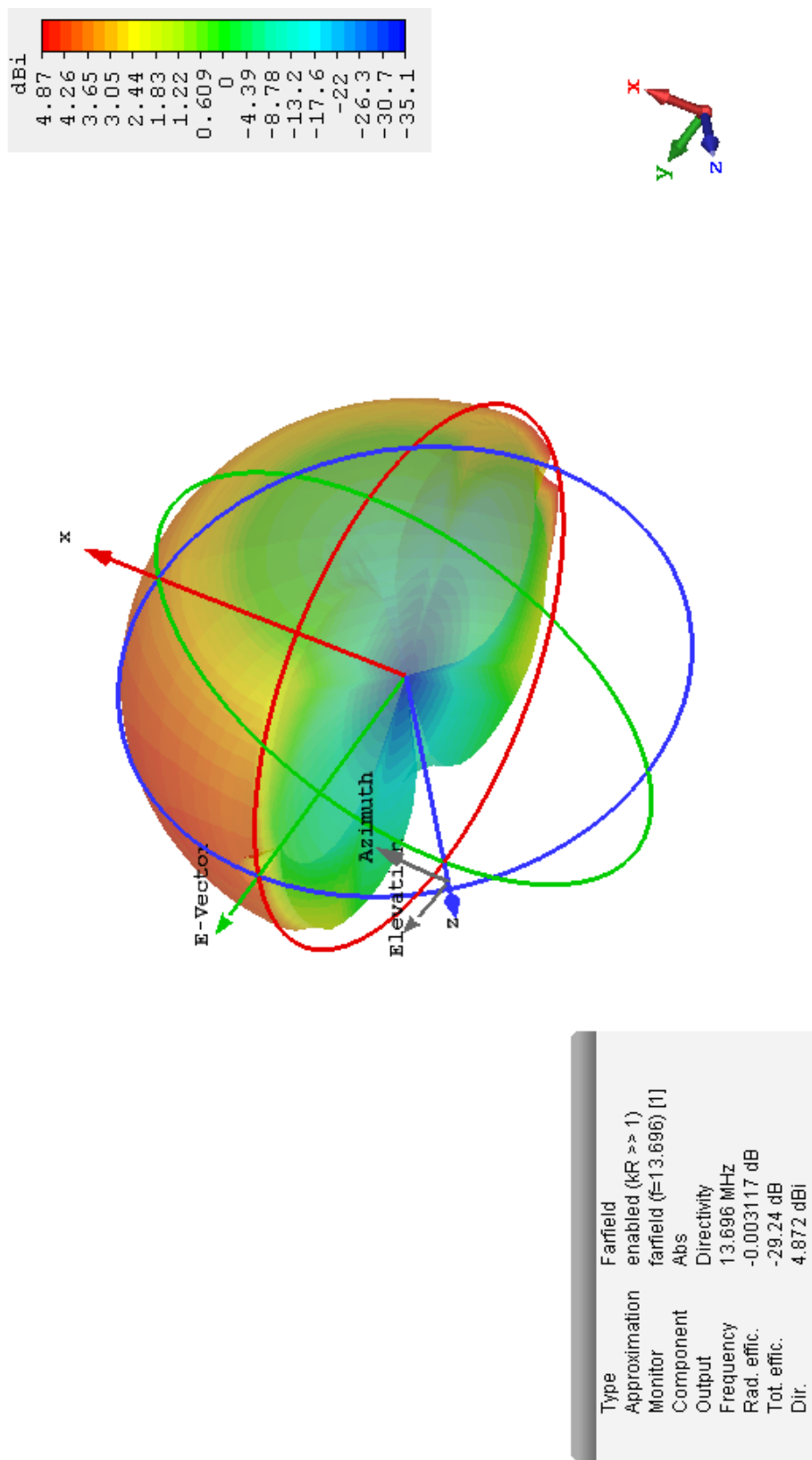
B Magnetická smyčková anténa



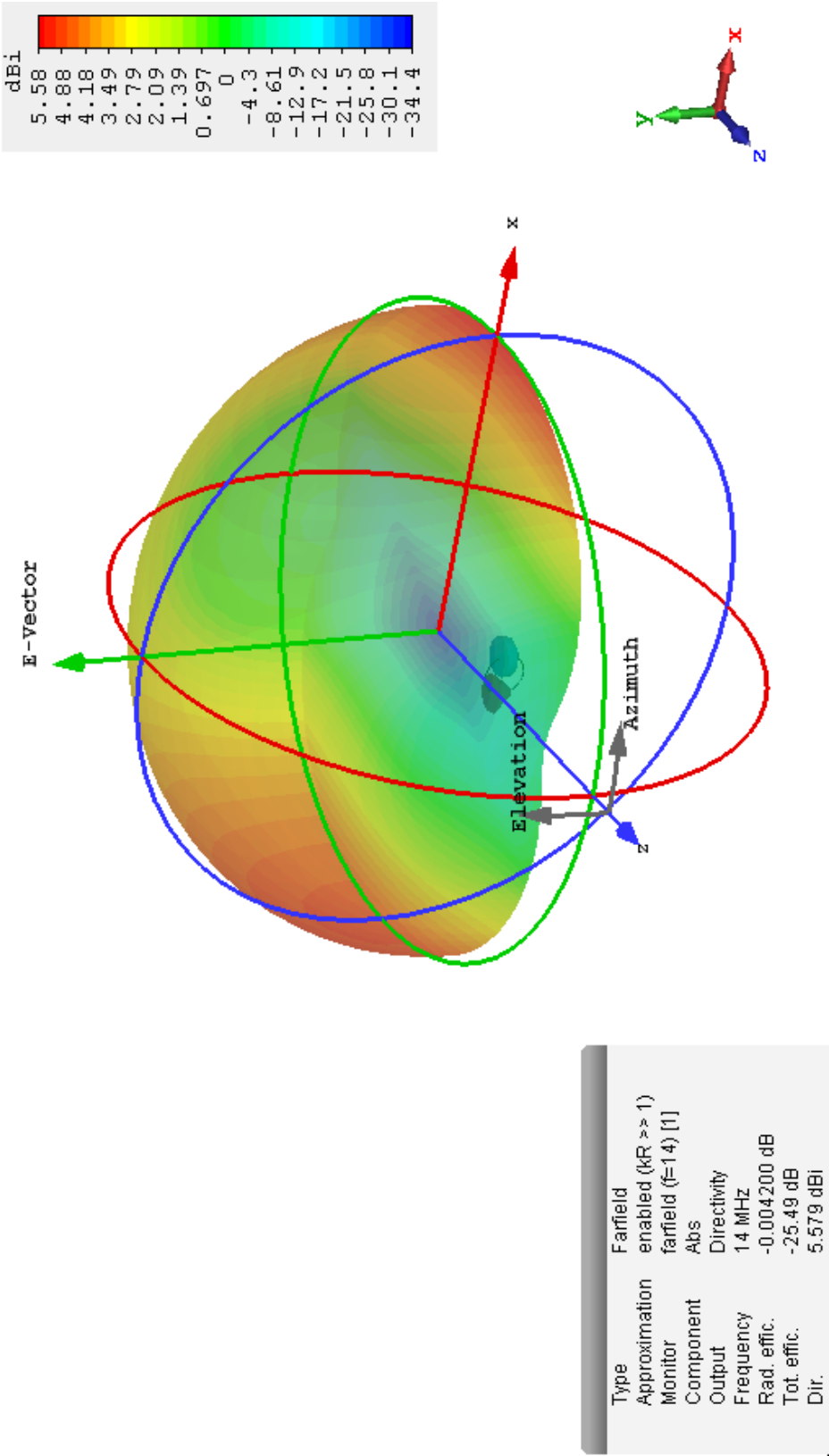
Obrázek B.1: Indukční vazba nestíněná - směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí



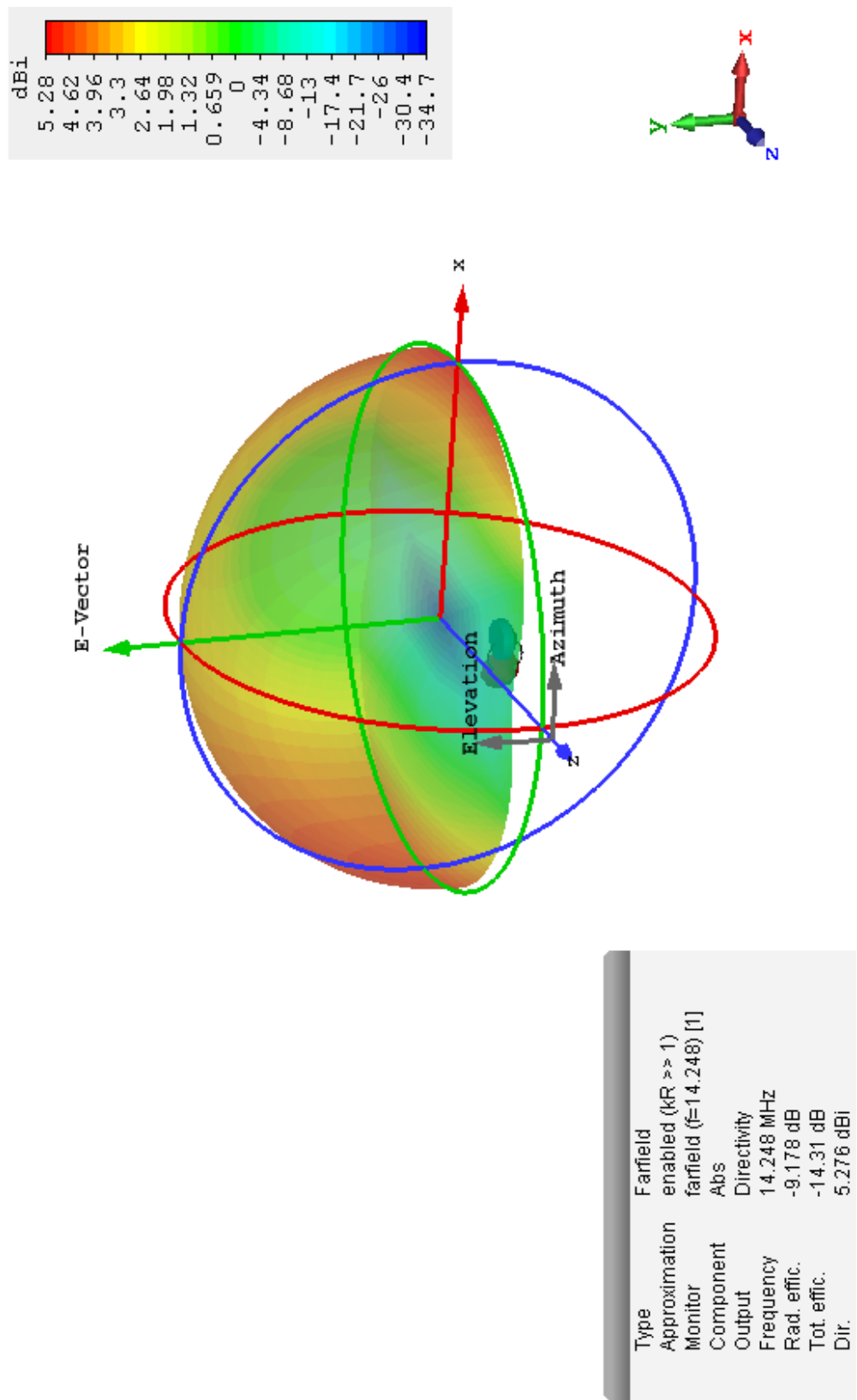
Obrázek B.2: Indukční vazba stíněná - směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí



Obrázek B.3: Kapacitní vazba - směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí

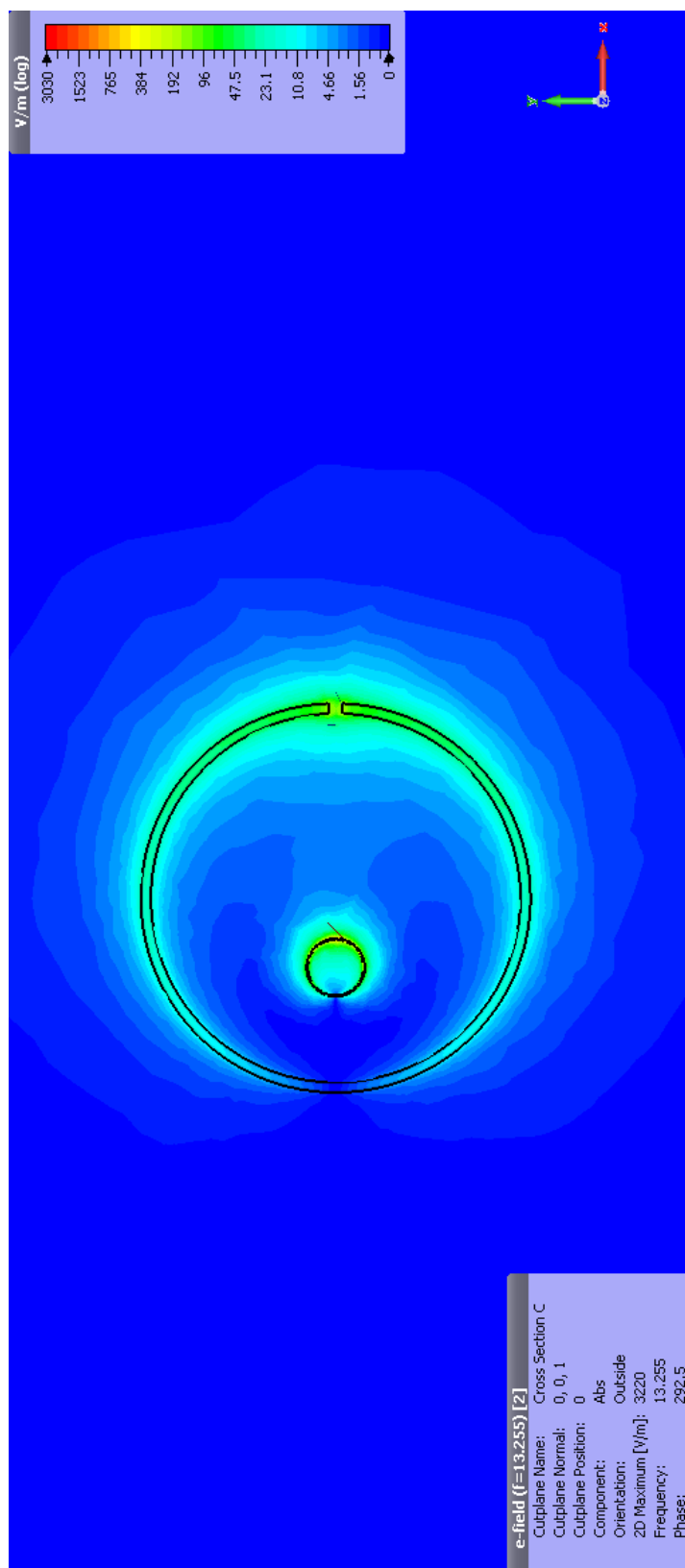


Obrázek B.4: *GAMA* pahýl - směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí

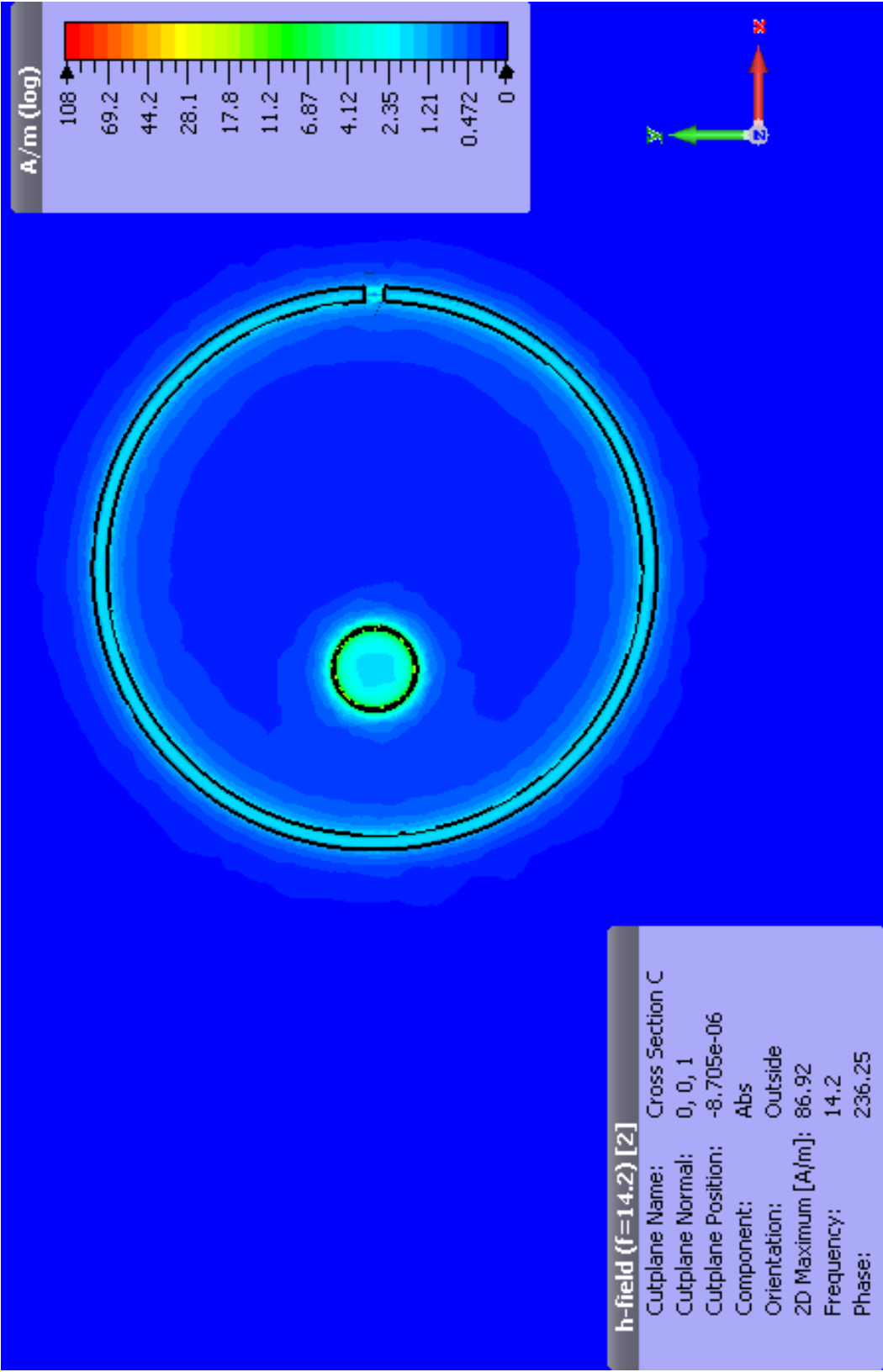


Obrázek B.5: Toroidní transformátor - směrová charakteristika ve výšce 2 metry nad zemí

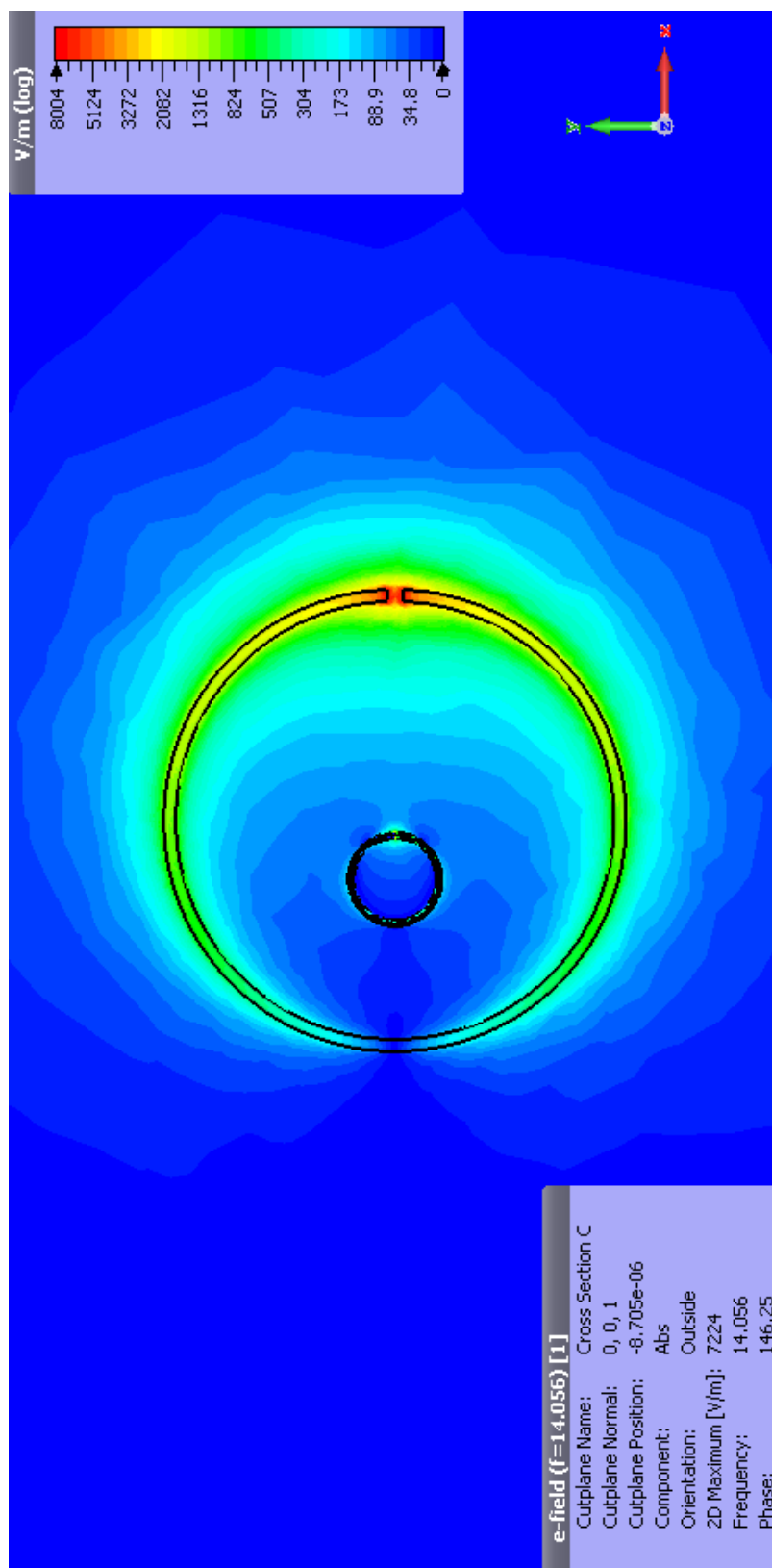




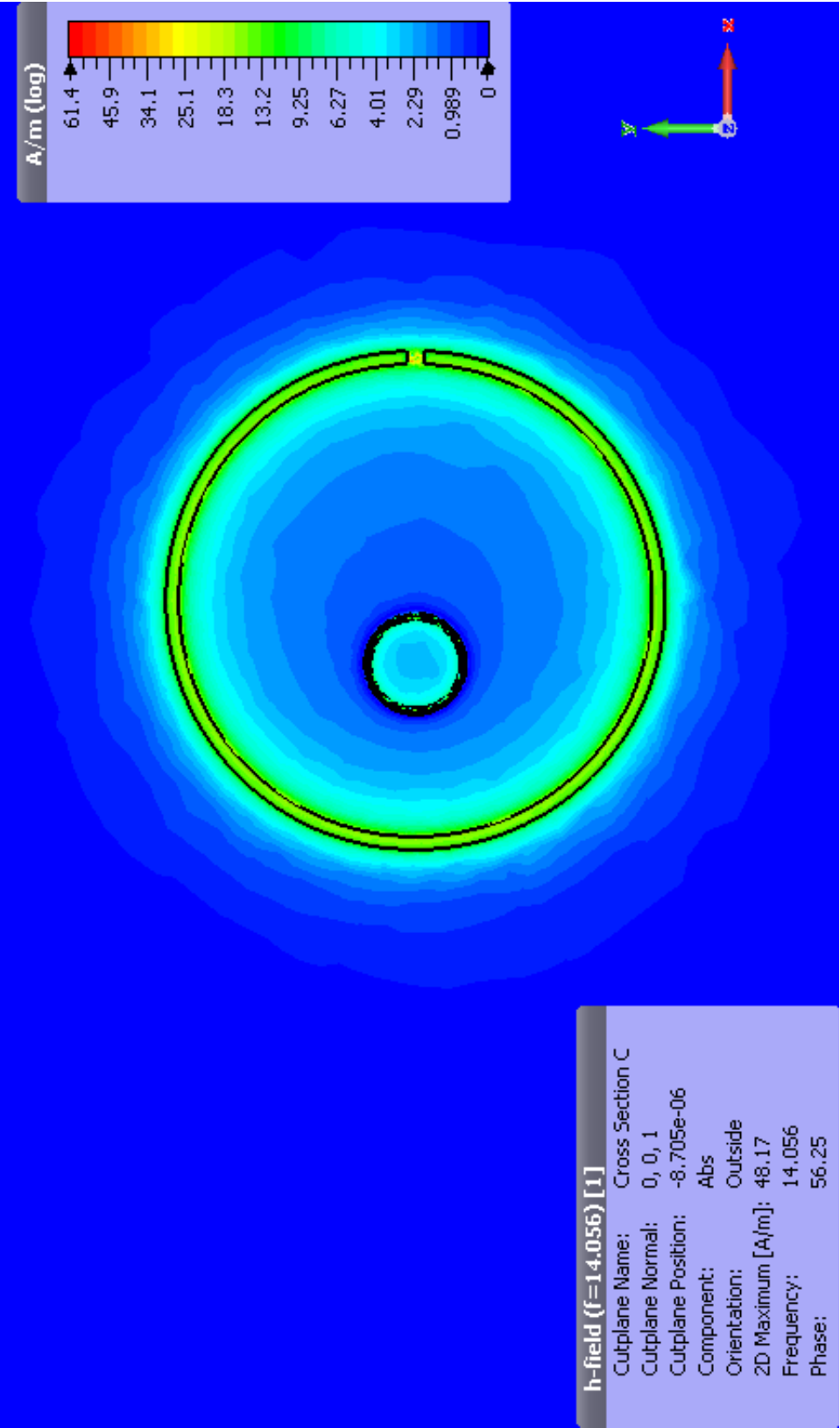
Obrázek B.6: Indukční vazba nestíněná - E-field



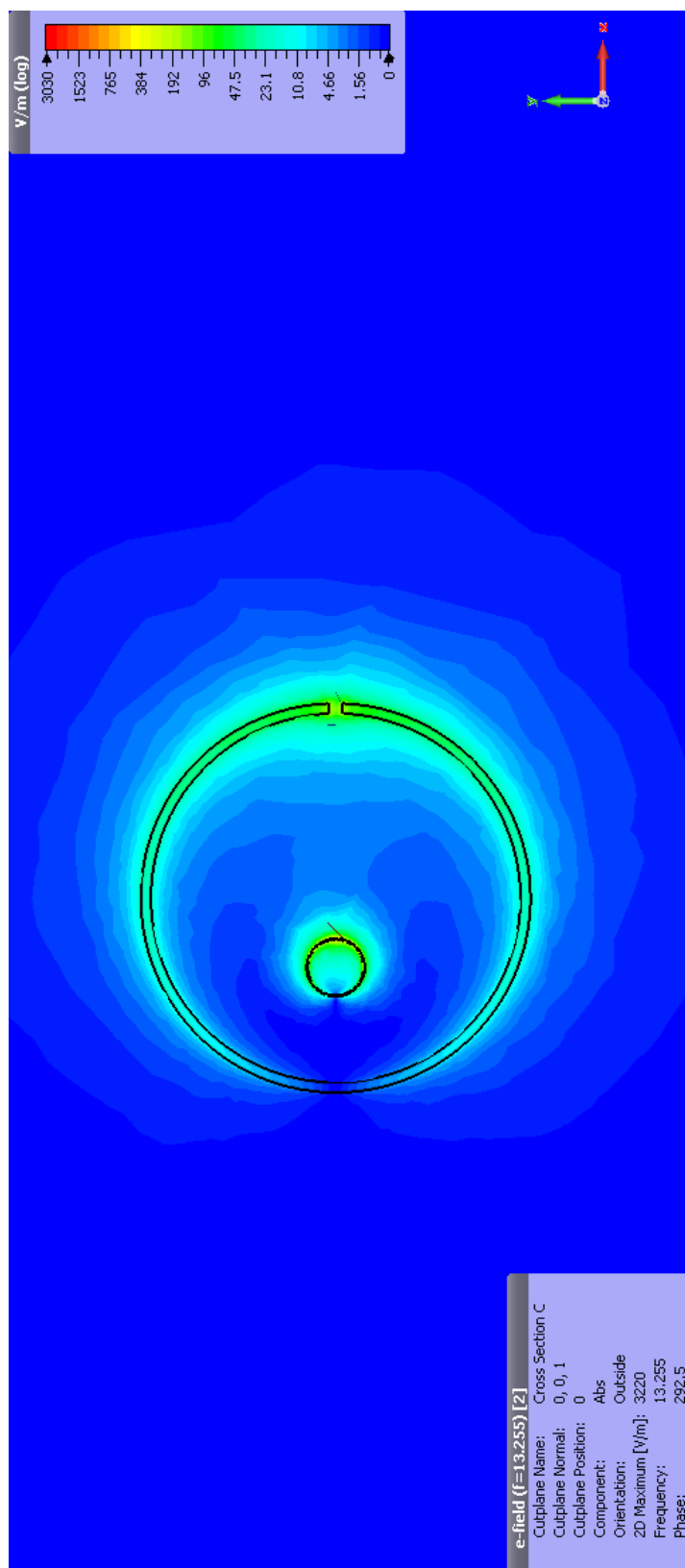
Obrázek B.7: Indukční vazba nestíněná - H-field



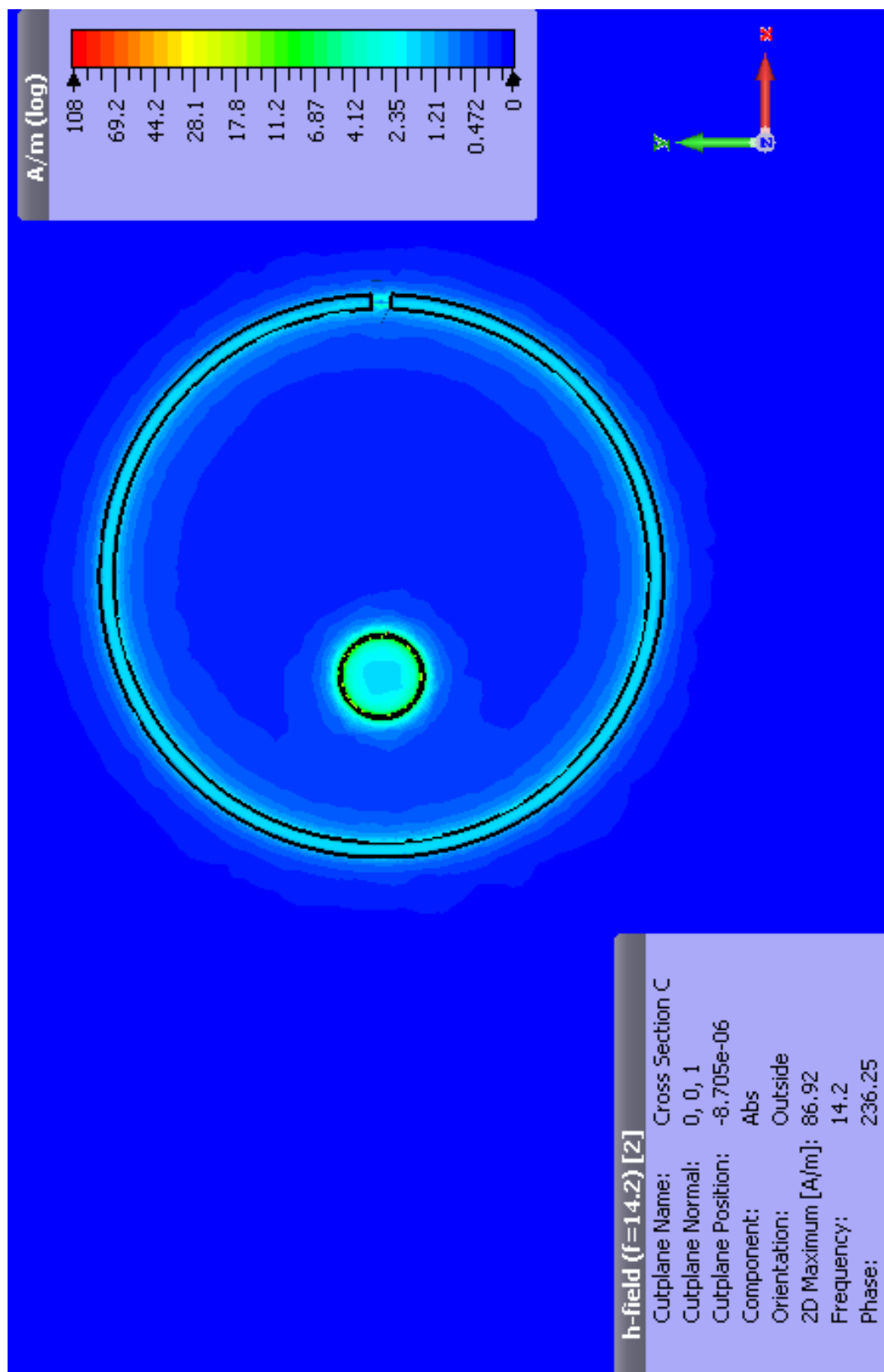
Obrázek B.8: Indukční vazba stíněná - E-field



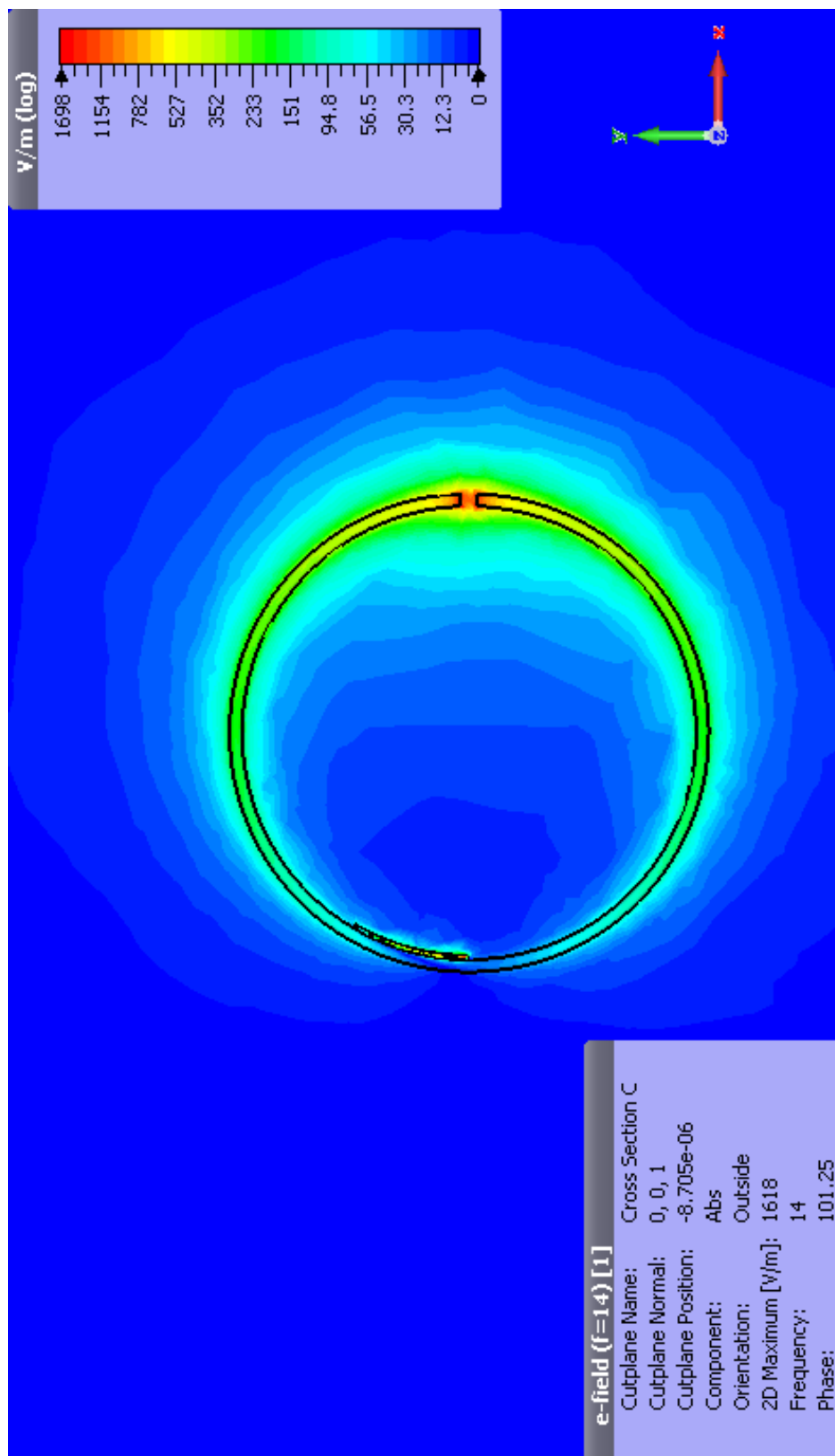
Obrázek B.9: Indukční vazba stíněná - H-field

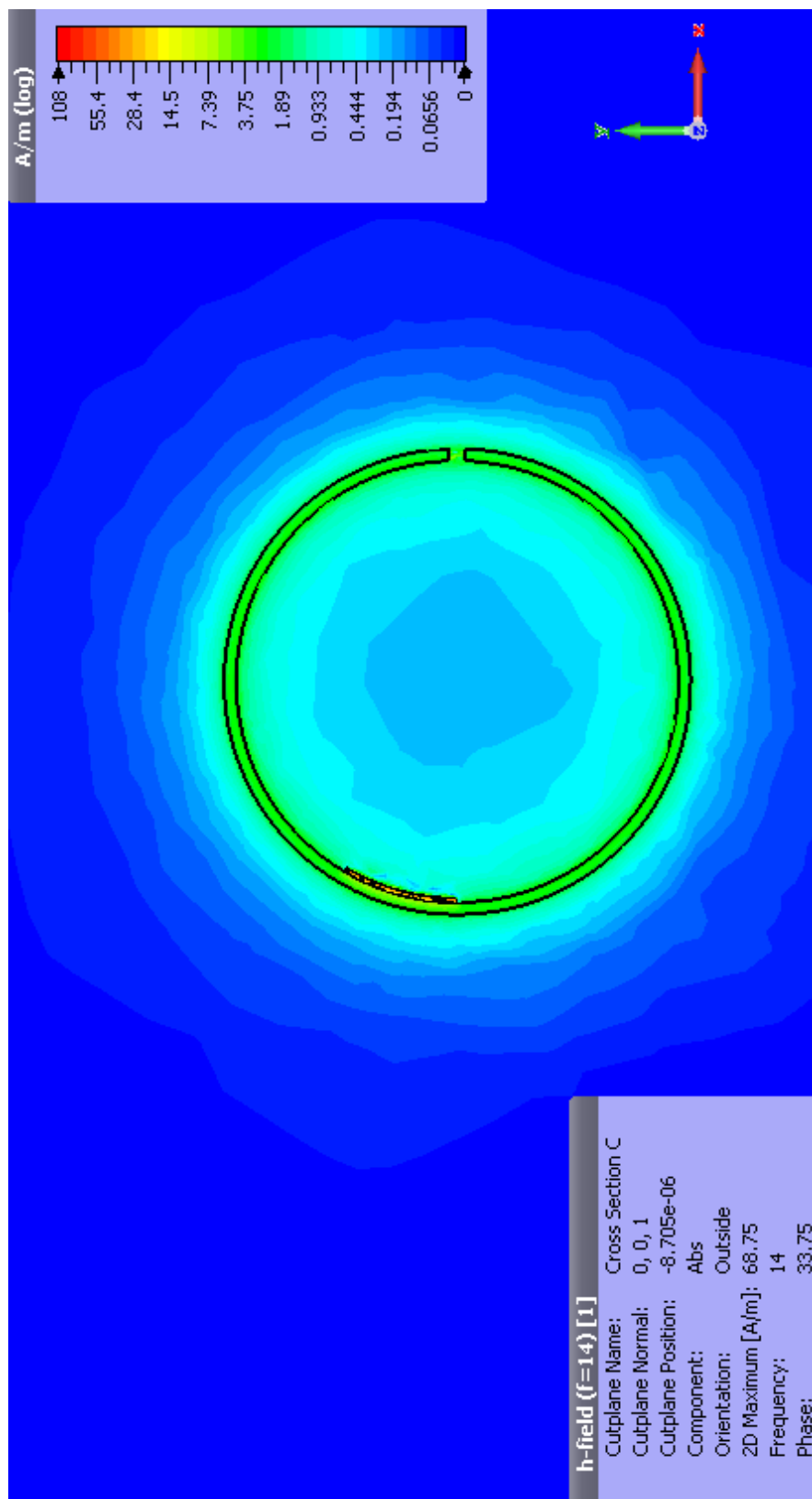


Obrázek B.10: Kapacitní vazba - E-field

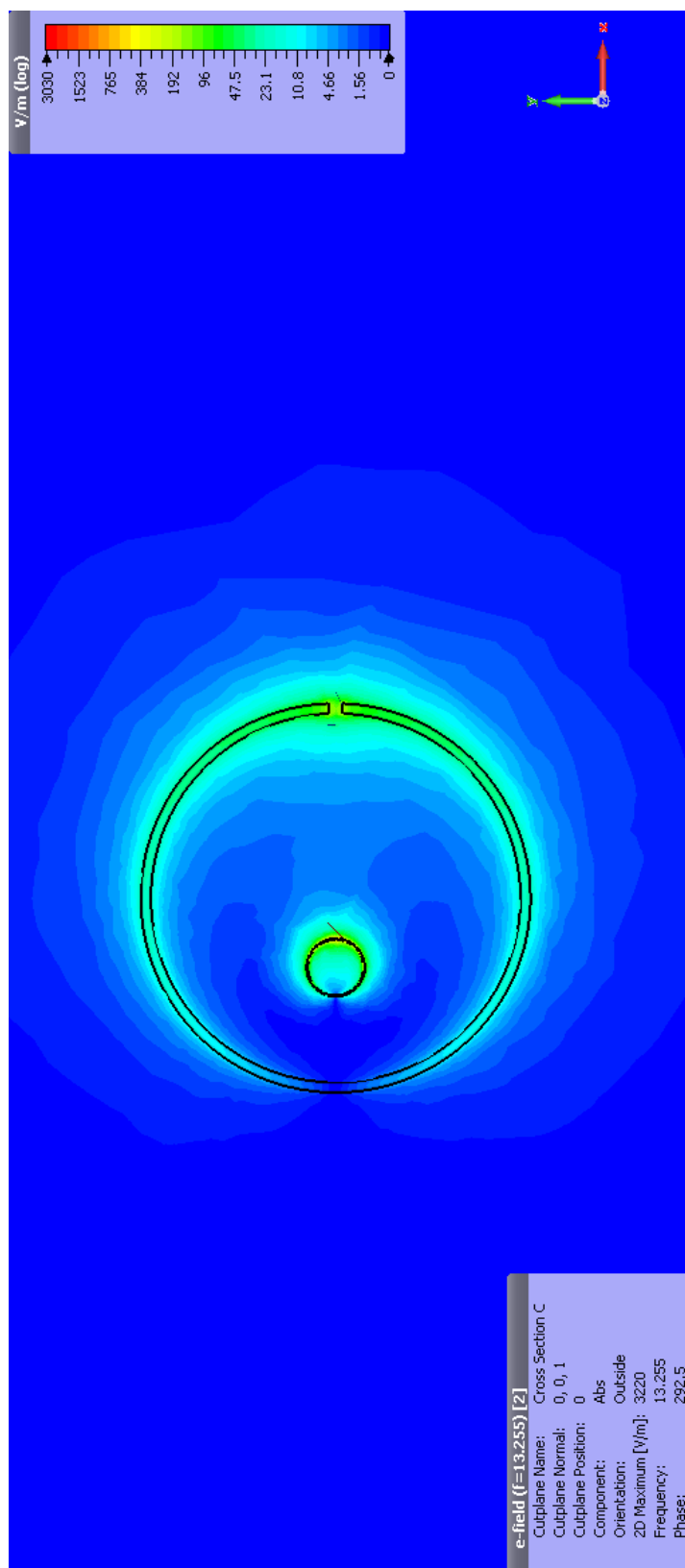


Obrázek B.11: Kapacitní vazba - H-field

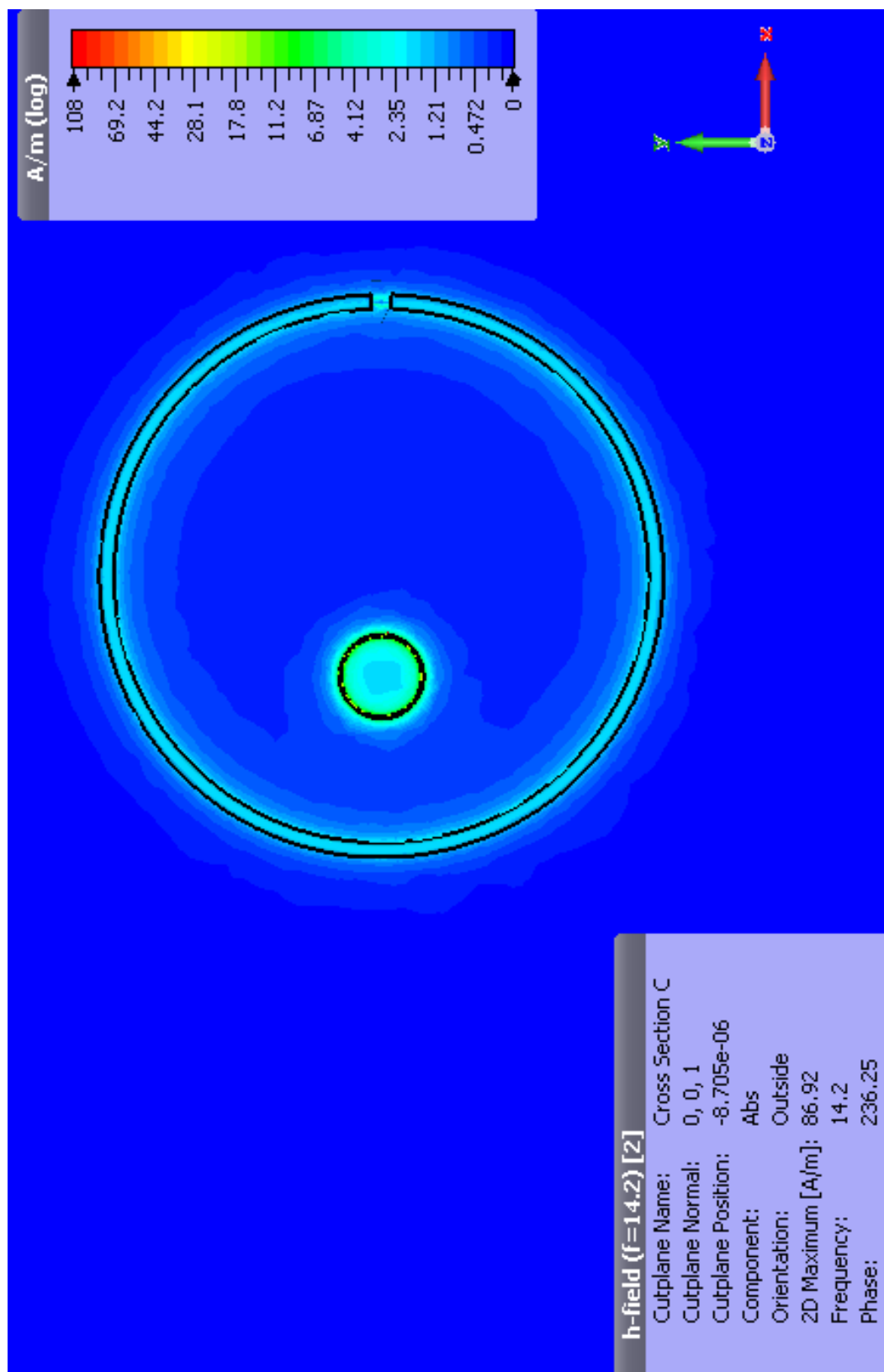
Obrázek B.12: *GAMA* pahýl - E-field

Obrázek B.13: *GAMA* pahýl - H-field





Obrázek B.14: Toroidní transformátor - E-field



Obrázek B.15: Toroidní transformátor - H-field